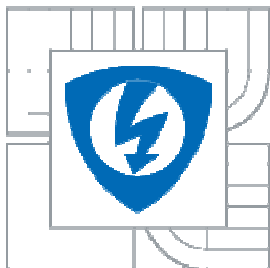


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

VÝVOJ FUNKČNÍCH BLOKŮ PRO AUTONOMNÍ FOTOVOLTAICKÝ SYSTÉM

FUNCTIONAL BLOCKS FOR THE DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS PHOTOVOLTAIC
SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. KAREL OVESNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BAČA, Ph.D.

BRNO 2011

Abstrakt

Práce se zabývá realizací systému, který umožní testovat vliv šesti různých režimů na životnost akumulátoru. Systém bude spojen s počítačem, který bude provádět měření proudu a napětí a přepínat mezi nabíjecím a vybíjecím režimem. Měřené veličiny se v určitých časových intervalech budou zaznamenávat do paměti počítače. Po určitém čase budou tyto data vyhodnocena a bude stanoven nejvýhodnější provozní režim.

Abstract

The project considers realization system, which will allow us to test six different operation modes on lifetime accumulators. The system will link to computer, which will execute measurement current and tension and switch between charging and discharging modes. The measured values will record in someone time intervals in to computer memory. After someone time will analyse these measured valuer and will provide optional operation mode.

Klíčová slova

solární článek, fotovoltaický článek, autonomní fotovoltaický systém, nabíječ, vybíječ, olověný akumulátor, reléová karta

Keywords

solar cell, photovoltaic cell, autonomous photovoltaic system, charger, discharger, lead-acid accumulator, relay card

Bibliografická citace díla:

OVESNÝ, K. *Vývoj funkčních bloků pro autonomní fotovoltaický systém*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 55 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 26. 5. 2011

.....

Karel Ovesný

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Petru Bačovi, Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci. Dále děkuji Bc. Lubošovi Svobodovi za spolupráci při realizaci praktické části projektu a při orientaci v problematice tohoto projektu.

OBSAH

Seznam obrázků.....	- 9 -
Seznam tabulek.....	- 10 -
Teoretická část.....	- 11 -
Úvod	- 11 -
Cíle práce.....	- 12 -
Fotovoltaika.....	- 13 -
1. Fotovoltaické systémy	- 13 -
1.1 Autonomní systém (Grid-off).....	- 13 -
1.2 Hybridní Grid-off systém	- 14 -
1.3 Systém připojený k veřejné rozvodné síti (Grid-on)	- 15 -
2. Historie fotovoltaiky.....	- 15 -
3. Princip fotovoltaické přeměny.....	- 16 -
4. Materiály a technologie pro výrobu solárních článků	- 18 -
4.1 Monokrystalický křemík	- 19 -
4.2 Polykrystalický křemík.....	- 20 -
4.3 Amorfni křemík	- 21 -
4.4 Galium Arsenid (GaAs).....	- 22 -
4.5 Sulfid kademnatý (CdS)	- 22 -
4.6 Anorganicko - organické materiály	- 22 -
4.7 Nanotechnologie.....	- 22 -
4.8 Nestandardní mechanismy.....	- 23 -
5. Konstrukce a zapojení fotovoltaických modulů a panelů.....	- 23 -
Akumulátory	- 26 -
6. Historie akumulace elektrické energie	- 26 -
7 Primární články, sekundární články, baterie	- 26 -
8 Rozdělení akumulátorů.....	- 27 -
8.1 Základní rozdělení	- 27 -
8.2 Olověné akumulátory	- 27 -
8.3 Složení olověných akumulátorů	- 28 -
8.3.1 Startovací akumulátory.....	- 28 -
8.3.2 Trakční akumulátory.....	- 29 -
8.3.3 Staniční akumulátory	- 30 -
8.3.4 Solární akumulátory	- 31 -
Regulátory a měniče	- 32 -
9. Regulátor	- 32 -
10. Měnič napětí	- 32 -
Experimentální část	- 33 -
11. Komponenty systému	- 33 -
11.1 Moduly nabíječů.....	- 33 -
11.2 Moduly vybíječů.....	- 35 -
11.3 Přepínací reléová karta	- 35 -
11.4 Reléová karta pro nastavení proudu	- 36 -
11.5 Modul přepínání mezi FV panely a laboratorním zdrojem	- 37 -
11.6 Moduly pro nastavení napětí nabíječů.....	- 38 -

11.7	Mikroprocesorová deska.....	- 38 -
11.8	Modul pro ochranu akumulátorů	- 38 -
11.9	Hardware pro sběr dat.....	- 40 -
11.10	Software pro ovládání experimentu.....	- 41 -
11.10.1	Fotovoltaika	- 41 -
11.10.2	Kapacita	- 44 -
11.10.3	Set parameters.....	- 45 -
12.	Instalace systému	- 47 -
13.	Příprava a montáž FV panelů	- 48 -
14.	Spuštění experimentu	- 51 -
Závěr		- 52 -
Použitá literatura.....		- 53 -
Seznam použitých symbolů		- 55 -

Seznam obrázků

Obr. 1:	Nejjednodušší fotovoltaický systém [2]	- 13 -
Obr. 2:	Autonomní fotovoltaický systém [2]	- 14 -
Obr. 3:	Hybridní autonomní systém [3]	- 14 -
Obr. 4:	Systém připojený k veřejné rozvodné síti [2]	- 15 -
Obr. 5:	Princip fotovoltaické přeměny [5]	- 16 -
Obr. 6:	Znázornění procesu termalizace při absorpci fotonu s velkou energií [6]	- 17 -
Obr. 7:	Schéma náhradního modelu [6]	- 17 -
Obr. 8:	Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku [6]	- 18 -
Obr. 9:	Spektrum slunečního záření	- 19 -
Obr. 10:	Czochralského metoda tažení monokrystalu [2]	- 19 -
Obr. 11:	Fotovoltaický článek z monokrystalického křemíku s charakteristickými zaoblenými rohy [4]	- 20 -
Obr. 12:	Fotovoltaický článek z polykrystalického křemíku s rovnými hranami oproti monokrystalickému křemíku [4]	- 21 -
Obr. 13:	Fotovoltaický modul článků z amorfního křemíku [10]	- 21 -
Obr. 14:	Diodová ochrana sériově řazených článků [4]	- 24 -
Obr. 15:	Diodová ochrana paralelně řazených článků [4]	- 24 -
Obr. 16:	Mechanická konstrukce solárního panelu v hliníkovém rámu [4]	- 24 -
Obr. 17:	Další z možných řešení vnitřní struktury panelu [4]	- 25 -
Obr. 18:	Vybíjecí a nabíjecí křivka oloveného akumulátoru [13]	- 28 -
Obr. 19:	Složení startovacího akumulátoru [13]	- 29 -
Obr. 20:	Trakční článek s kladnými trubkovými elektrodami [13]	- 30 -
Obr. 21:	Staniční akumulátory	- 30 -
Obr. 22:	Solární akumulátor	- 31 -
Obr. 23:	Model nabíječe v programu PSpice [16]	- 34 -
Obr. 24:	Schéma zapojení nabíječe [16]	- 34 -
Obr. 25:	Schéma zapojení vybíječe [16]	- 35 -
Obr. 26:	Schéma přepínací reléové karty [16]	- 36 -
Obr. 27:	Schéma releové karty pro nastavení proudu [16]	- 37 -
Obr. 28:	Fotografie finálního modulu přepínání FV/Zdroj	- 38 -
Obr. 29:	Schéma zapojení odpojovače [17]	- 39 -
Obr. 30:	Fotografie finálního modulu odpojovačů	- 40 -
Obr. 31:	Terminál PCLD-8710	- 40 -
Obr. 32:	Záložka Vybíjení programu Fotovoltaika	- 42 -
Obr. 33:	Záložka Nabíjení programu Fotovoltaika	- 43 -
Obr. 34:	Záložka Nastavení programu Fotovoltaika	- 44 -
Obr. 35:	Program Kapacita	- 45 -
Obr. 36:	Ovládací prostředí programu Set Parameters	- 46 -
Obr. 37:	Fotografie rozložení jednotlivých komponent jednoho z modulů	- 47 -
Obr. 38:	Pohled na konstrukci a FV panely zezadu	- 48 -
Obr. 39:	Pohled na FV panely zepředu	- 49 -

Seznam tabulek

Tab. 1	Srovnání účinnosti jednotlivých druhů křemíkových článků [2]	- 22 -
Tab. 2	Tabulka naměřených parametrů FV článků.....	- 50 -

Teoretická část

Úvod

V dnešní době, kdy spotřeba elektrické energie stále stoupá, se snažíme hledat alternativní a ekologičtější způsoby výroby elektrické energie. Dva hlavní způsoby výroby této energie v současnosti jsou v tepelných či jaderných elektrárnách, kde se využívají neobnovitelné zdroje fosilních paliv. Oba tyto způsoby výroby mají své výhody i nevýhody. U tepelných elektráren je výhoda velkého instalovaného výkonu (až jednotky GW) a kombinace s teplárnami pro rozvod tepla a ohřev vody. Mezi nevýhody tepelných elektráren patří emise oxidů dusíku, oxidu siřičitého, prachu a v neposlední řadě také emise oxidu uhličitého, který se velkou měrou podílí na vzniku skleníkového efektu, což vede ke globálnímu oteplování Země. Další velkou nevýhodou tepelných elektráren je zásah do krajiny při těžbě paliva, kterým je černé a hnědé uhlí. Jaderné elektrárny mají oproti tepelným, při běžném provozu, výhodu nulových emisí škodlivých látek. Velkou nevýhodou je technologicky náročné získávání paliva a skladování vyhořelého paliva. Další nevýhodou je možnost úniku radiace při havárii těchto elektráren, která je sice malá, ale přesto možná.

Jedna z možností náhrady těchto hlavních způsobů výroby elektrické energie je využití energie Slunce, která je dostupná všude na Zemi s omezením střídání dne a noci, přeměnou na elektrickou energii v solárních článkách.

Technologie výroby a materiály pro výrobu solárních článků jsou v dnešní době velmi rozsáhlé. Mezi nejrozšířenější patří články vyráběné z polovodičových materiálů jako např. monokrystalický křemík, u kterých je účinnost přeměny až 17%. Poslední dobou se také studují organické materiály, u kterých je sice účinnost přeměny zatím do 5%, ale velkou výhodou je jednodušší a ekologičtější technologie výroby oproti anorganickým materiálům.

V této práci se budu zabývat jedním ze způsobů využití energie ze solárních článků a to autonomním systémem, který najde využití ve vzdálených pracovních stanicích, domech a chatkách mimo dosah rozvodné sítě. V teoretické části popíšu jednotlivé části systému, jejich vlastnosti a specifikace. Experimentální část pak bude věnována jednotlivým blokům, které jsem realizoval spolu s Bc. Lubošem Svobodou, který se touto problematikou zabýval už ve své bakalářské práci.

Cíle práce

Hlavním cílem této práce je vytvořit autonomní fotovoltaický systém, který bude sloužit k optimalizaci různých režimů nabíjení a vybíjení olověných akumulátorů, pro zajištění maximální životnosti těchto akumulátorů v reálném provozu. Systém, který měl plnit tuto funkci, byl již na ústavu elektrotechnologie realizován, nebyl však dostatečně vyladěn a došlo k jeho selhání a zničení akumulátorů při chybě řídicího programu, který dovolil tyto akumulátory zcela vybit. Toto však nebyl jediný problém, docházelo také k současnému nabíjení a vybíjení akumulátorů a také nebyl systém moc přehledný co se týče rozložení a návrhu jednotlivých komponent.

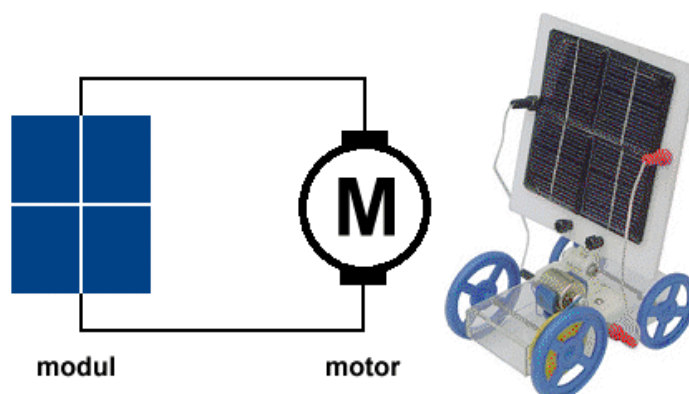
Proto je třeba celý systém přepracovat a z důvodu stěhování do nové budovy na Technické 10 ho také přemístit. Důležité je ochránit akumulátory proti jejich opětovnému zničení vhodným obvodem, který je při kritickém poklesu napětí zcela odpojí od systému a připojení bude možné pouze hardwarovou cestou, pověřenou osobou. Dále pak musí být odstraněn problém s možností současného spuštění procesů nabíjení a vybíjení. Jednotlivé komponenty budou navrhovány tak, aby byl celý systém přehledný a co nejlépe srozumitelný.

Po dokončení prací na systému a jeho odladění by měl systém dlouhodobě testovat šest různých režimů na šesti akumulátorech a z naměřených a vyhodnocených výsledků bude vybrán optimální režim nabíjení a vybíjení.

Fotovoltaika

1. Fotovoltaické systémy

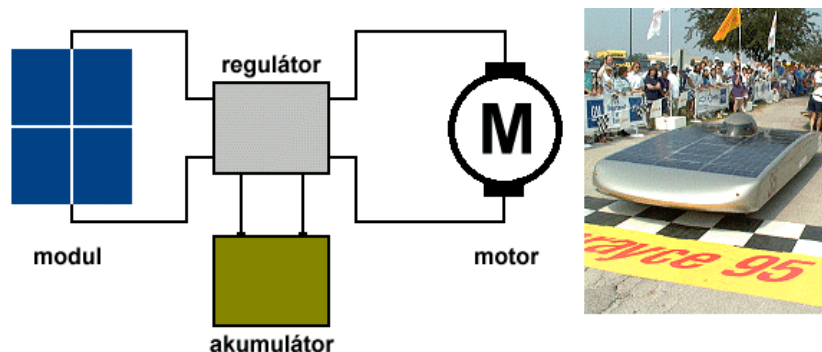
Solární článek, modul těchto článků, panel modulů či sestava panelů (pole) je schopna po vystavení slunečnímu záření generovat elektrický proud, který je závislý na intenzitě tohoto záření a ten dodat přímo do spotřebiče. To je nejjednodušší fotovoltaický systém (Obr. 1), který má využití v aplikacích, kde nám nevadí omezení dodávky elektrické energie pouze v době osvětlení. Příkladem využití může být napájení čerpadla pro závlahu, ventilace v uzavřených prostorách atd. K efektivnějšímu využití této sestavy je třeba přidat např. akumulátorové baterie k nashromáždění přebytečné energie z panelů pro použití této energie v noci nebo v bezslunečném období. Dále pak může systém obsahovat regulační zařízení - pro kontrolu nabíjení a vybíjení akumulátorů, měnič napětí - v případě že nechceme pořízovat speciální spotřebiče na nižší napětí, nebo chceme systém připojit k pevné elektrické síti, sledovač Slunce a další indikační a měřicí přístroje. [1]



Obr. 1: *Nejjednodušší fotovoltaický systém* [2]

1.1 Autonomní systém (Grid-off)

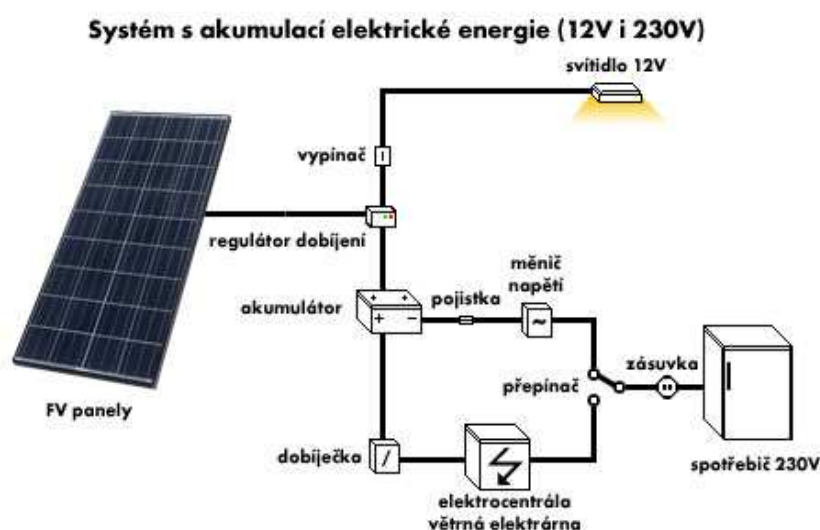
Jak už bylo zmíněno v úvodu jedná se o systém (Obr. 2), který je instalován v místech bez pevné přípojky elektrické energie, nebo je přípojka velmi daleko. Výkon takového systému se pohybuje v rozmezí 10W - 10kW špičkového výkonu. Při návrhu autonomního systému je nutné brát ohled na potřebu místa pro skladování akumulátorů, jejichž množství se odvíjí od potřeby požadovaného výkonu a spotřeby. Je kladen důraz na používání úsporných spotřebičů a také na minimální ztráty energie v systému. Je možné použít spotřebiče jak na stejnosměrný proud (při napětí 12V nebo 24V), tak na střídavý proud (230V/50Hz) při použití měniče napětí. [1]



Obr. 2: *Autonomní fotovoltaiický systém [2]*

1.2 Hybridní Grid-off systém

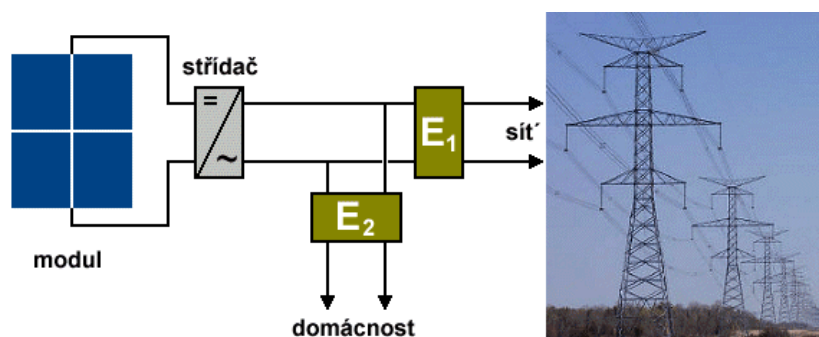
Množství slunečního svitu závisí na ročním období, to má za následek méně vyrobené energie v zimním období než v létě, tuto skutečnost je potřeba nějak kompenzovat. Jedním z možných řešení je dimenzovat systém právě na zimní období, což ale vede ke zvýšení počtu a plochy instalovaných panelů a tím i navýšení ceny celého systému. Naopak v letním období bude tento systém značně předimenzovaný a jeho výkon nevyužitý. V takovém případě přijdou na řadu doplňkové zdroje elektrické energie, které budou využity právě v období, kdy nebudou moci fotovoltaiické panely dodat potřebné množství energie. Za takové zdroje považujeme například spalovací generátor, v nejlepším případě s možností kogenerace (výroba elektrické a tepelné energie současně), větrný generátor, nebo malá vodní elektrárna. Při výběru doplňkového zdroje záleží na možnostech využití jednotlivých zdrojů energie (dostatečné větrné podmínky, vodní zdroj s dostatečným průtokem vody). [1]



Obr. 3: *Hybridní autonomní systém [3]*

1.3 Systém připojený k veřejné rozvodné síti (Grid-on)

Největšího využití najde tento systém v oblasti s hustým pokrytím elektrické sítě, kdy ve slunečném období využívají spotřebiče energii ze solárních panelů a případná přebytečná energie je dodána přes elektroměr do veřejné rozvodné sítě. Naopak při nedostatečném slunečném svitu je energie odebírána z veřejné rozvodné sítě přes druhý elektroměr. Celý systém je plně automatizovaný, takže nepostřehneme přepínání mezi jednotlivými režimy. Instalovaný výkon bývá v rozmezí 1kW - 100kW. Pro připojení k veřejné rozvodné síti je třeba stejnosměrné napětí z fotovoltaických panelů transformovat na střídavé 230V/50Hz pomocí měniče napětí se střídačem a synchronizovat jej se sítí. [1]



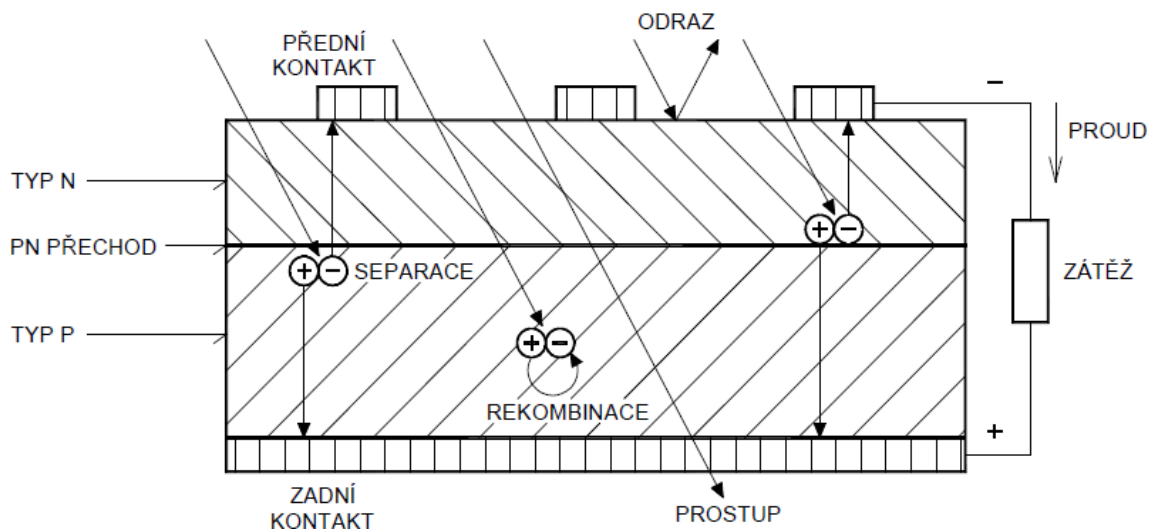
Obr. 4: Systém připojený k veřejné rozvodné síti [2]

2. Historie fotovoltaiky

Objev fotovoltaického jevu z roku 1839 je připisán francouzskému fyzikovi Edmundu Becquerelovi, který pozoroval výchylku ručičky galvanometru na platinových elektrodách ponořených v elektrolytu. Pánové W.G. Adams a R.E. Day pozorovali fotoelektrický jev na selenu v roce 1877. Zlom nastal v roce 1918, kdy polský vědec Jan Czochralski objevil způsob růstu monokrystalu křemíku. Postupem času byl fotovoltaický efekt objeven i u sirníku kadmia a oxidu mědi, ale křemík se jevil jako nejvhodnější materiál. První křemíkový článek vyrobil v roce 1941 Američan Russel Ohl, patentovat si ho však nechali pánové D.M. Chapin, C.S Fuller a G.L. Pearson 5.3.1954. Jejich první křemíkové články měly účinnost 4,5% a později 6%.

Urychlení vývoje způsobilo rozhodnutí o využití solárních článků jako zdroje energie pro satelity a družice v kosmickém průmyslu. V roce 1958 dosahovala účinnost 9% a v roce 1960 už 14%. První umělá družice využívající napájení ze solárních článků byla americká družice Vanguard I, kterou napájely 0,1W články o ploše 100cm², která fungovala 8 let. Následovala ji sonda Explorer VI, kterou napájelo 9600 článků o rozměrech 1x2 cm. [4]

3. Princip fotovoltaické přeměny

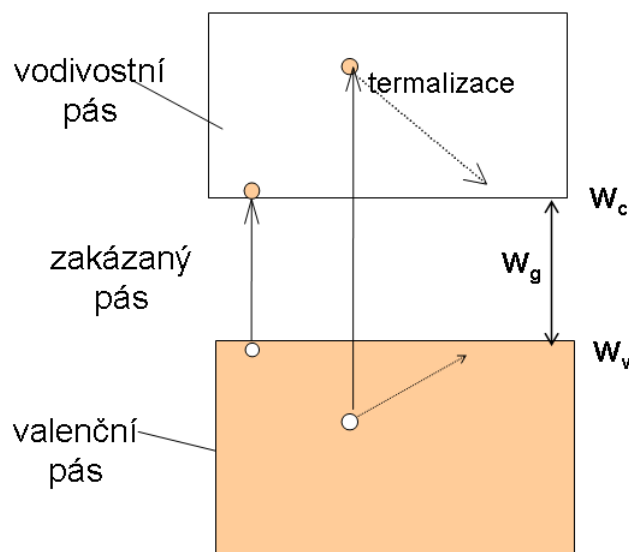


Obr. 5: *Princip fotovoltaické přeměny* [5]

Fotovoltaický článek si můžeme představit jako velkoplošnou polovodičovou diodu, většinou s jedním či více PN přechody. Pokud na povrch této velkoplošné diody dopadne světlo o intenzitě Φ_{in} může dojít k jeho absorpci, kde množství světla o intenzitě Φ_0 , které vstoupí do objemu materiálu, je rovno

$$\Phi_0 = \Phi_{in} (1 - R) \quad (1),$$

kde R je odrazivost. Intenzita dopadajícího světla klesá se vzdáleností od povrchu při průchodu materiálem, kde absorpční koeficient α je závislý na vlnové délce λ dopadajícího světla. Pokud dojde k interakci fotonu s kmity krystalové mřížky, nebo s volnými elektrony, zvýší se střední kinetická energie těchto částic a tím dojde ke zvýšení teploty. Pro materiály s kovalentní vazbou platí, že pokud má dopadající foton dostatečnou energii, může tento uvolnit elektron z krystalové mřížky. Tím vznikne volný pár elektron - díra, kde se oba nosiče náboje (kladný i záporný) mohou volně pohybovat v objemu materiálu a tím náboj přenášet. Pokud má absorbovaný foton energii větší než je energie zakázaného pásu W_g , tak se přebytečná energie tohoto fotonu přemění na teplo a dochází k tzv. *procesu termalizace* znázorněném na Obr. 6. [6]

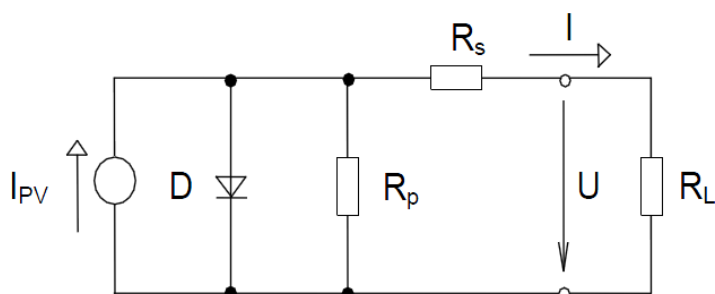


Obr. 6: Znáznornění procesu termalizace při absorpci fotonu s velkou energií [6]

Uvolněný elektron z krystalové mřížky se také může vrátit do svého původního stavu a dojde k tzv. rekombinaci. V ustáleném stavu jsou procesy generace a rekombinace volných nosičů v rovnováze a platí pro ně

$$\Delta n = \tau G \quad (2)$$

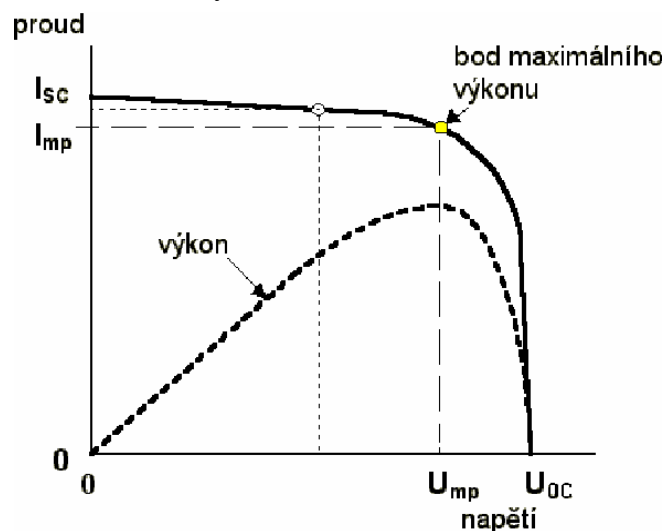
kde Δn je koncentrace nerovnovážných nosičů, τ je doba života těchto nosičů a G je počet párů elektron - díra. Generované nosiče náboje jsou vlivem vnitřního elektrického pole v oblasti přechodu (potenciálová bariéra) urychlovány a to tak, že elektrony se hromadí v polovodiči typu N a díry v polovodiči typu P. Na kontaktech článku tak naměříme fotovoltaické napětí $\approx 0,6V$. Po připojení ke spotřebiči obvodem protéká proud, který je přímo úměrný intenzitě dopadajícího záření a ploše článku. Při dopadu fotonu na povrch článku může dojít také k jeho odrazu a v případě malé energie také k průchodu, kdy se neúčastní generace volných nosičů náboje. Fotovoltaický článek lze nahradit modelem znázorněným na Obr. 7. [6]



Obr. 7: Schéma náhradního modelu [6]

kde R_p je paralelní svodový odpor PN přechodu, R_s je sériový odpor samotného materiálu a proudových sběrnic. [6]

Na Obr. 8 je znázorněna V-A charakteristika fotovoltaického článku s výkonovou závislostí a vyznačeným bodem maximálního výkonu článku.



Obr. 8: Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku [6]

kde I_{sc} je zkratový proud tekoucí článkem při napětí 0V, I_{mp} je proud při max. výkonu, U_{mp} je napětí při max. výkonu a U_{oc} je napětí naprázdno bez zátěže. Na velikost napětí na prázdko U_{oc} má vliv teplota článku, kdy v důsledku rychlého růstu intrinsické koncentrace nosičů s rostoucí teplotou toto napětí klesá. [6]

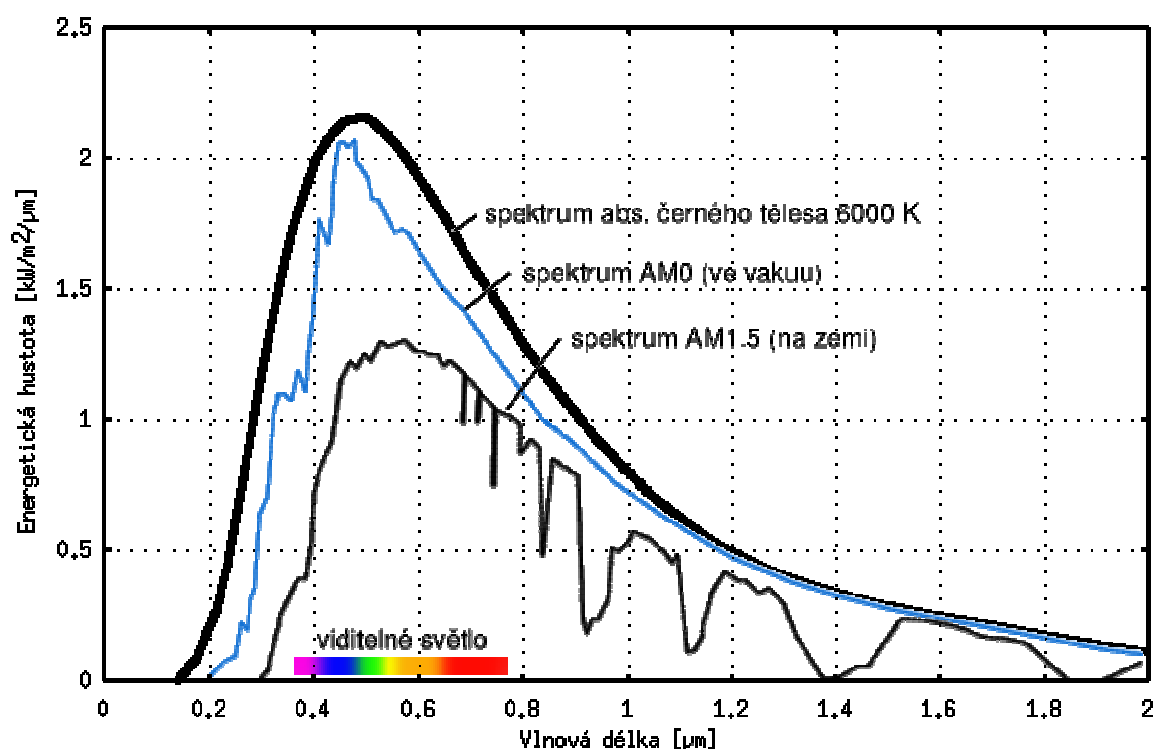
4. Materiály a technologie pro výrobu solárních článků

Vhodnost použitého materiálu závisí na šířce jeho zakázaného pásu, to vyplývá ze spektra slunečního záření, které na Zemi dopadá. Tento průběh je znázorněn na Obr. 9. S klesající vlnovou délkou záření jeho energie roste. Nejvíce používaný a nejprozkoumanější prvek je křemík, šířka jeho zakázaného pásu je 1,12eV, což odpovídá vlnové délce asi 1,1 μ m. Jeho dostupnost je velmi dobrá, jelikož oxid křemičitý je v zemské kůře obsažen přibližně 30%. Technologie získávání a zpracování čistého křemíku je velmi dobře zvládnutá a pro snížení ceny fotovoltaických článků se využívá odpadového křemíku z polovodičového průmyslu. [4]

Vyskytuje se v několika modifikacích:

- monokrystalický
- polykrystalický
- amorfní

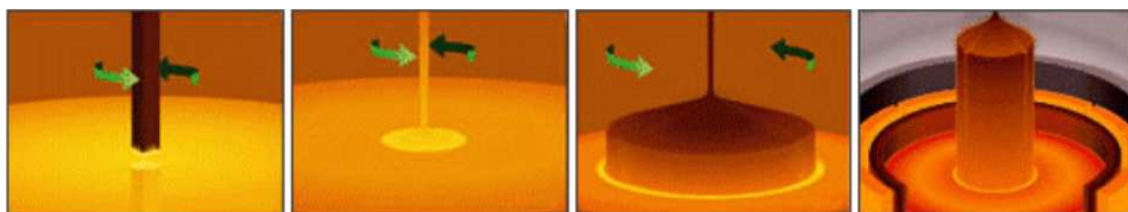
Články vyrobené z monokrystalického křemíku dosahují nejvyšší účinnosti z výše uvedených, musí však na ně dopadat světlo kolmo, proto se hodí do systémů, které se otáčejí za sluncem. Polykrystalické články dosahují menší účinnosti, ale dokážou využít i světlo rozptýlené (difúzní) a cenově jsou výhodnější oproti článkům z monokrystalického křemíku.



Obr. 9: Spektrum slunečního záření

4.1 Monokrystalický křemík

Připravuje se tažením monokrystalu z taveniny Czochralského metodou. Takto vytažený ingot má průměr až 300mm a ořeže se do tvaru hranolu se zaoblenými rohy. Tento hranol se dále rozřeže na plátky o tloušťce až 400μm. Při řezání hranolu na plátky dochází ke ztrátám užitečného materiálu až 40%. Tento "ztrátový" (odpadový) materiál se vloží zpět do taveniny pro další zpracování. [4]



Obr. 10: Czochralského metoda tažení monokrystalu [2]

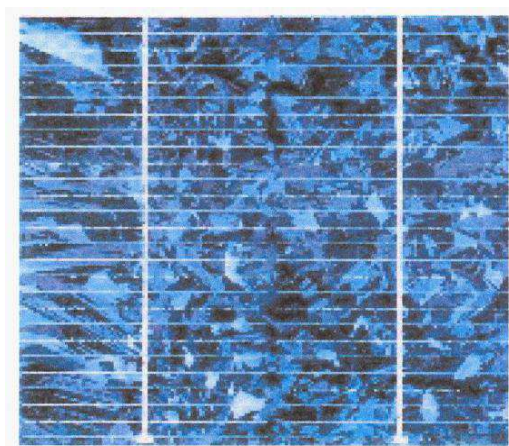
Samotné destičky se pak chemicky upravují leptáním pro odstranění poškození jejich povrchu při řezání. Odleptaný povrch je pak texturovaný a vytvoří se na něm miniaturní pyramidy, které snižují odraz dopadajícího světla. Následně se materiál dopuje příměsmi pro vytvoření polovodiče P (bór) a N (fosfor) typu difúzí a dojde k vytvoření samotného PN přechodu. Ve fázi konečných úprav se na povrch článku nanese antireflexní vrstva nevodivého nitridu křemíku, který snižuje odrazivost povrchu a chrání povrch článku před mechanickým poškozením a je příčinou typického modrého zabarvení povrchu. Dále se sítotiskovou metodou na povrch článku vytvoří kontakty pro odvod proudu z povrchu článku - na spodní části se vytvoří hustá mříž kontaktů a na vrchní osvětlené se vytvoří síť, která zakryje asi 4-8% povrchu pro zachování co největší aktivní plochy článku. [2] [6]



Obr. 11: *Fotovoltaický článek z monokrystalického křemíku s charakteristickými zaoblenými rohy [4]*

4.2 Polykrystalický křemík

Výhoda oproti monokrystalickému křemíku je energeticky a cenově výhodnější technologie přípravy křemíku, kdy probíhá řízené tuhnutí taveniny v blocích. Bloky mají oproti monokrystalickému ingotu pravidelný tvar čtverce bez oblých hran, ale náhodná orientace krystalických zrn neumožňuje texturaci povrchu alkalickým leptáním. Hranice zrn zvyšují ztráty rekombinací. Operace řezání, nanášení antireflexní vrstvy a nanášení kontaktů jsou obdobné jako u monokrystalického křemíku. [4] [6]



Obr. 12: *Fotovoltaický článek z polykrystalického křemíku s rovnými hranami oproti monokrystalickému křemíku [4]*

4.3 Amorfní křemík

Atomy v amorfním křemíku jsou uspořádány nahodile. Tenká vrstva křemíku může být nanесena na pevný i ohebný materiál. Účinnost těchto článků je nejmenší ze všech křemíkových a najdou uplatnění v aplikacích s malým požadovaným výkonem (kapesní kalkulátory, přenosné solární nabíječky atd.). Na rozdíl od krystalických materiálů nejsou vyráběny jednotlivé články, ale celé moduly najednou. [4]



Obr. 13: *Fotovoltaický modul článků z amorfního křemíku [10]*

Tab. 1 Srovnání účinnosti jednotlivých druhů křemíkových článků [2]

Křemíkový materiál	Laboratorní podmínky (%)	Běžné podmínky (%)
monokrystalický	~ 24	14 - 17
polykrystalický	~ 18	13 - 15
amorfní	~ 13	5 - 7

4.4 Galium Arsenid (GaAs)

Články vyráběné z tohoto materiálu dosahují velké účinnosti (až 25%) a jsou odolné proti vysokým teplotám a tvrdému kosmickému záření. Naopak jeho nevýhodou je vyšší pořizovací cena oproti krystalickému křemíku a větší hustota GaAs (5200 kg.m^{-3} oproti křemíku 2330 kg.m^{-3}). V současnosti se vyvíjejí články vyráběné kombinací těchto dvou materiálů k dosažení účinností až 30% v důsledku odlišné spektrální citlivosti obou materiálů. [4]

4.5 Sulfid kademnatý (CdS)

Jedná se o články tvořené přechodem Cu_2S a CdS , jejichž účinnost dosahuje 10%. Hlavní výhodou je malá hmotnost těchto článků, což je předurčuje ke kosmickým aplikacím. Naopak jejich velkou nevýhodou je špatná stabilita a proto se v dnešní době již nepoužívají. [8]

4.6 Anorganicko - organické materiály

Levné organické sloučeniny jako např. sulfid železnatý FeS , sulfid měďnatý CuS , oxid měďnatý CuO a selenid kademnatý CdSe . Strukturu článku tvoří aktivní vrstva klastrů selenidu kademnatého ve vodivém polymeru poly-(3-hexylthiofenu) o tloušťce 200nm. Při dopadu fotonu vznikne v CdSe pár elektron – díra. Elektrony proudí z klastrů do anody, díry se přenášejí prostřednictvím vodivého polymeru do katody, přičemž vzniká potenciálový rozdíl 0,7 V. [8]

Způsob jak zlepšit vlastnosti solárních článků jsou nové a vylepšené technologie výroby:

4.7 Nanotechnologie

Poslední dobou hodně diskutované téma jsou nanočástice - uhlíkové nanotrubičky. Zvýšení účinnosti můžeme dosáhnout nanostrukturními útvary, které mají vliv na zvýšení absorpce dopadajícího záření nebo zvýšením účinnosti separace párů elektron - díra. [9]

Separace párů elektron - díra - vyšší účinnosti lze docílit změnou rovinného uspořádání na strukturovaný povrch - zvětšíme plochu PN přechodu. Účinnost se tím zvýšila až o 46% oproti běžnému rovinnému uspořádání. [9]

Silně absorbující povrchy - zlepšení vlastností pomocí nanotechnologií lze uplatnit také při vytváření matnějších povrchů, které mají menší odrazivost. Touto technologií lze odstranit negativní vliv lesklého namodralého povrchu běžných fotovoltaických článků, který zvyšuje nechtěnou odrazivost části dopadajícího záření v modré oblasti spektra. Využívá se jak jednoduchého převrstvení křemíkového povrchu nanočásticemi křemíku metodou rotačního pokrytí až po složité vícevrstevné struktury, kdy odrazivost klesne až na 4%. [9]

4.8 Nestandardní mechanismy

Více elektronů z jednoho fotonu - při dopadu fotonu o vlnové délce kratší než 420nm na nanokrystal křemíku dochází k uvolnění dvou až tří elektronů. [9]

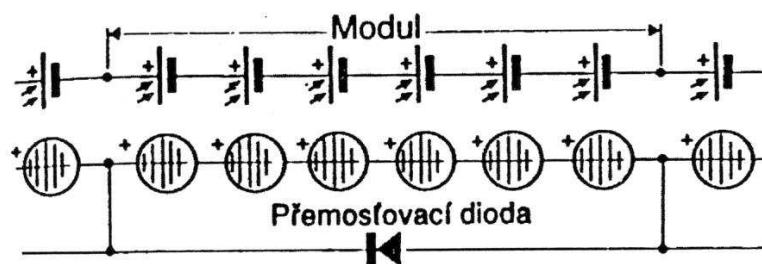
Štěpení fotonu - pomocí konvertoru z arsenidu hlinitého či fosfidu galitého lze rozštěpit foton s vysokou energií na dva fotony s nižší energií, čímž se zamezí nežádoucímu ohřevu článku přebytečnou energií. [9]

Koncentrační články - využitím Fresnelových čoček nebo Cassegrainovy montáže zrcadel lze nasměrovat více slunečního záření na aktivní plochu solárního článku a tak umožnit jejich použití i v lokalitách s menší průměrnou intenzitou dopadajícího záření jako je např. Česká republika. [9]

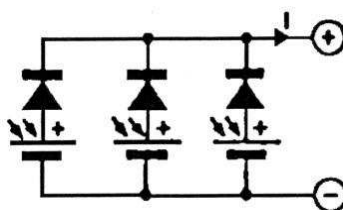
5. Konstrukce a zapojení fotovoltaických modulů a panelů

Jelikož jsou samotné články mechanicky a chemicky náchylné a jejich výkon nedostačující pro většinu aplikací, spojujeme je do modulů, panelů a polí. Ty už jsou opatřeny ochrannými prvky proti okolním vlivům a vhodně pospojovány tak aby měly dostatečný výkon (potřebné napětí a proud). [4]

Pro dosažení požadovaných výstupních veličin zapojujeme články sériově, paralelně nebo kombinovaně. Pro zvýšení napětí zapojujeme články do série, kde je výsledný proud roven proudu jednoho článku a pro vyšší proud zapojujeme články paralelně. Při spojení článků, ať už sériově nebo paralelně, může dojít k zastínění jednoho nebo více článků, které pak v obvodu působí jako zátěž. Při průchodu proudu těmito zastíněnými články se zvyšuje jejich teplota a může dojít až k jejich zničení. Proto se používají přemostovací (překlenovací) diody na určitý počet článků (modul). [4]



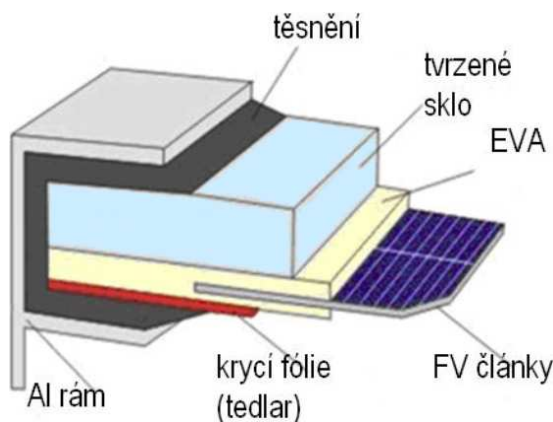
Obr. 14: Diodová ochrana sériově řazených článků [4]



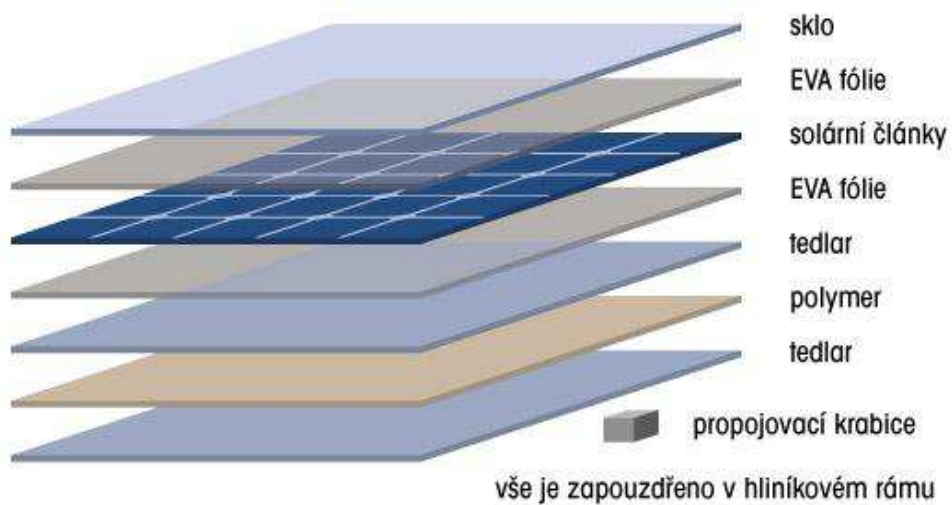
Obr. 15: Diodová ochrana paralelně řazených článků [4]

Kvalita provedení solárních panelů je důležitá pro dlouhodobou životnost a spolehlivost solárních článků v nich umístěných. Samotný článek je velmi křehký a metalizace jeho kontaktů by při vystavení vnějším vlivům podlehl korozi. Mechanická konstrukce panelů je velmi různorodá v závislosti na aplikaci pro kterou jsou určeny.

Horní krycí vrstva musí odolávat silnému krupobití a zároveň musí absorbovat co nejméně dopadajícího slunečního záření. V případě použití skla, jako horního krycího materiálu, musí být kalené, se sníženým obsahem železa. Z důvodu tepelného rozpínání článku jsou tyto zabaleny do etylenvinylacetátové (EVA) fólie, což je měkký umělohmotný materiál, dovolující tepelné rozpínání článku. EVA fólie má velmi dobré optické vlastnosti podobné hornímu krycímu sklu. Tím je docíleno stejnorodosti prostředí od povrchu panelu až k samotnému povrchu článku a zabrání se tím rozptylu a lomu světla při průchodu panelem. [4]



Obr. 16: Mechanická konstrukce solárního panelu v hliníkovém rámu [4]



Obr. 17: *Další z možných řešení vnitřní struktury panelu* [4]

Konstrukce panelu nemá vliv jen na ochranu modulů (článků), ale také na modularitu panelů začleněných v systému. Další jejich vlastností je i vzhled, jelikož mnohdy závisí i na tom jak celý systém vypadá, například při instalaci na plášť budovy. [4]

Akumulátory

Elektrickou energii, vyrobenou fotovoltaickými panely, je třeba ukládat pro využití v noci nebo ve dnech s menší intenzitou slunečního záření. K tomu slouží akumulátory, ve fotovoltaice převážně olověné, s velkým počtem nabíjecích cyklů a odolnější proti úplnému vybití.

6. Historie akumulace elektrické energie

O jeden z prvních pokusů se zasloužil Otto von Guericke, který v 15. století sestrojil první generátor statické elektřiny za pomoci rotující koule síry. O dalších sto let později byla objevena metoda uchování elektrického náboje. Přišel na ni Ewald Jürgen Georg von Kleist, když vyskládal skleněnou láhev stříbrnou fólií a do té pak přivedl elektrický proud z podobného generátoru. Snaha o objevení vhodného, přenosného zdroje elektrické energie nabyla reálnější podoby až v 18. století. Boloňský profesor medicíny Luigi Galvani, při studiu žabích končetin v roce 1786, zjistil reakci jejich svalů na elektrické podněty a pojmenoval tento jev jako "živočišná elektřina". [11]

Toho v 19. století využil hrabě Alessandro Volta a sestavil tzv. Voltův sloup. Kapalina z žabích nožiček posloužila jako elektrolyt a elektrody tvořily dva pásy, jeden z mosazi a druhý ze železa. Takto vytvořený článek generoval dostatek proudu na to aby se svaly žabích končetin stáhly. Jednalo se o první primární článek. V roce 1859 pak Francouz Gaston Platné sestavil první olověný článek, kdy mezi dvě olověné desky vložil plátěný separátor a ponořil je do roztoku kyseliny sírové. Napětí generované článkem bylo asi 2V a po vybití jej bylo možné znova nabít - byl to první sekundární článek. V roce 1899 se objevil první Nikl - Kadmiový článek, následoval Nikl - Železitý a v roce 1912 byly prováděny experimenty s Lithium - Iontovým články. [11]

Velikost, váhu a vysokou cenu dosavadních galvanických článků odstranil Francouz Laclanché. Tvůrcem prvního suchého článku byl však Němec Gessner, který elektrolyt zahustil kašovitou hmotou tak, že jej bylo možné použít v jakékoliv poloze. [11]

7 Primární články, sekundární články, baterie

Jako primární označujeme články, ve kterých se v průběhu vybíjení spotřebovávají materiály kladné a záporné elektrody, po vybití je už není možné znova nabít. Narozdíl od sekundárních článků jsou tyto schopné ihned po sestavení dodávat elektrickou energii. [11]

Sekundární články (akumulátory), jsou naopak schopny elektrickou energii v sobě opakovaně vázat (akumulovat) a je tedy možné je použít opakovaně jako zdroj proudu. [11]

Baterii pak tvoří sestava elektrochemických článků. U autobaterií, nebo těch využívaných ve fotovoltaike je to často 6 nebo 12 článků, v závislosti na požadovaném napětí (12V a 24V).

8 Rozdělení akumulátorů

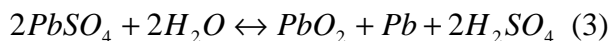
8.1 Základní rozdělení

- Olověné akumulátory
- Akumulátory na bázi niklu (NiCd, NiFe, NiMH)
- Akumulátory na bázi lithia (Li-ion, Li-pol)
- Akumulátory na bázi alkalických elektrolytů s MnO_2

Pro nás nejzajímavější a ve fotovoltaike nejvyužívanější jsou olověné akumulátory. Jsou relativně levné, odolné proti poruchám a proti okolním vlivům a jejich technologie je na velmi vysoké úrovni.

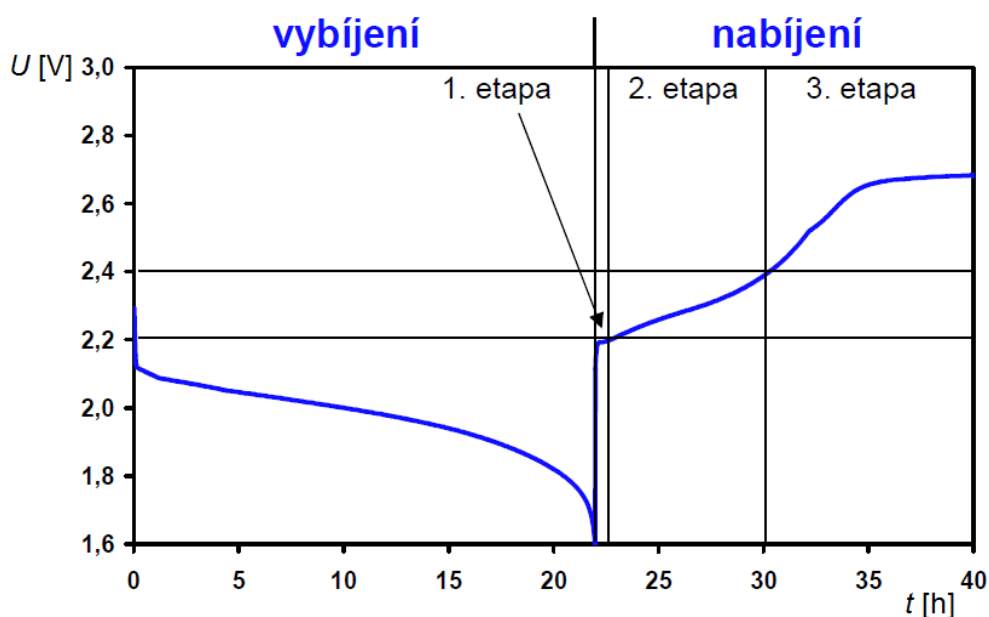
8.2 Olověné akumulátory

Tyto akumulátory jsou tvořeny články z olověných elektrod, zapojenými do série, ponořenými v roztoku kyseliny sírové, ředěné destilovanou vodou pro dosažení požadované hustoty. Chemický proces, který v článku probíhá v průběhu nabíjení či vybíjení lze popsat vztahem: [12]



kde směr zleva doprava značí nabíjení a zprava doleva vybíjení. V průběhu nabíjení se tvoří kyselina sírová H_2SO_4 a elektrolyt zvyšuje svoji hustotu. Při plném nabití je kladná elektroda pokryta vrstvou oxidu olovičitého a záporná elektroda je pokryta malou vrstvou olova. [12]

V průběhu vybíjení je tomu naopak, elektrolyt snižuje svou hustotu v důsledku spotřeby H_2SO_4 . Při vybití se na kladné elektrodě vytvoří červenohnědý povlak oxidu olovičitého a na záporné elektrodě tmavošedý povlak olova. Právě měnící se hustota elektrolytu je spolehlivým ukazatelem stavu akumulátoru. Dalším ukazatelem je rostoucí napětí v průběhu nabíjení a pomocným ukazatelem je tzv. plynování elektrod. Je to známka ukončení rozkladu síranu olova a počátek elektrolýzy vody. Při elektrolýze se voda rozkládá na kyslík a vodík, který při vyšší koncentraci tvoří s kyslíkem explozivní směs. Proto se doporučuje nabíjet akumulátory v dobře větraných místnostech nebo v otevřeném prostoru. [12]



Obr. 18: Vybíjecí a nabíjecí křivka olověného akumulátoru [13]

Průběh nabíjení a vybíjení akumulátoru je znázorněn na Obr. 18. Křivka nabíjení je rozdělena do tří etap. 1. etapa při nabíjení je charakterizována zvětšováním napětí v souvislosti s tvorbou kyseliny sírové v pórech elektrod. Ve druhé etapě se přeměňuje síran olovnatý a ve třetí etapě se začne rozkládat i voda a napětí článku už dále neroste. [12]

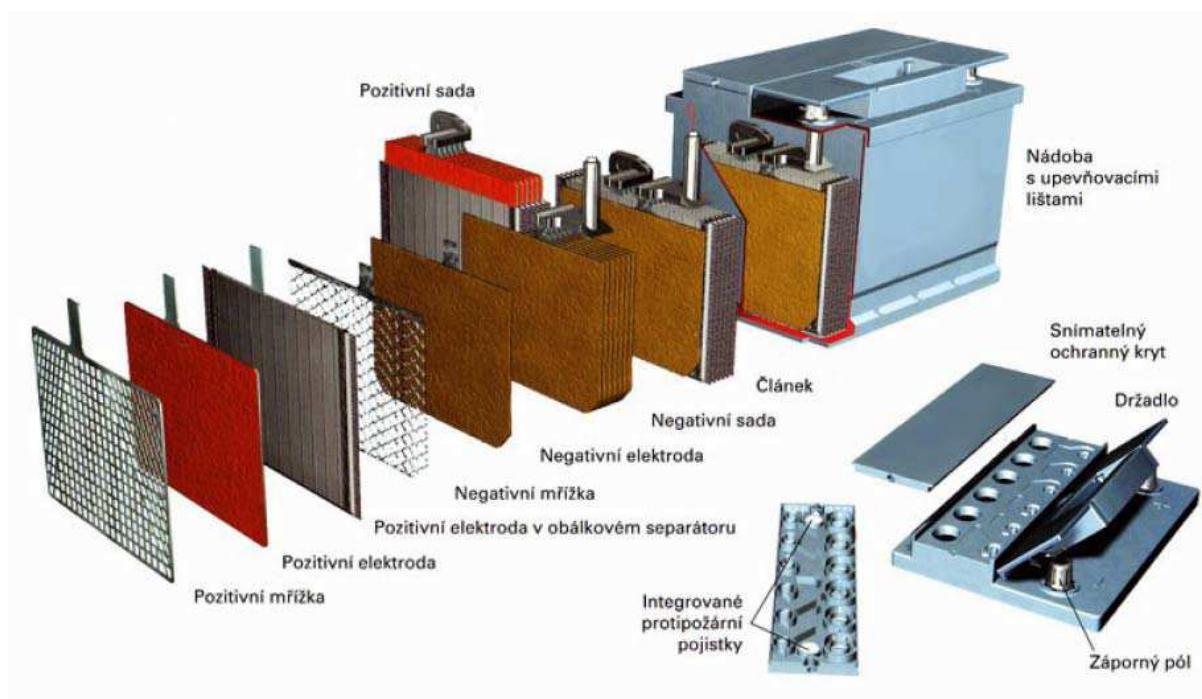
8.3 Složení olověných akumulátorů

Základní složení olověných akumulátorů je v podstatě stejné - několik do série zapojených článků. Konstrukce jako taková se ale liší, v závislosti na aplikaci pro kterou je akumulátor použit.

8.3.1 Startovací akumulátory

Jsou určeny k rozběhu benzínových a dieselových motorů a napájení jejich příslušenství. Je třeba aby tyto akumulátory měly velkou měrnou kapacitu pro malé vybíjecí proudy a zároveň byly schopny poskytnout možnost krátkodobého odběru velkých proudů. [13]

Akumulátor je tvořen šesti samostatnými monobloky, které představují jednotlivé články zapojené do série. Každý monoblok obsahuje sadu kladných a záporných olověných elektrod, které jsou odděleny separátory. Vše je upevněno v robustní plastové nádobě, tak aby celý akumulátor odolal provozním podmínkám (vibrace, vysoké a nízké teploty, prudké změny teploty) a nedošlo k úniku elektrolytu. [13]



Obr. 19: Složení startovacího akumulátoru [13]

8.3.2 Trakční akumulátory

Slouží k pohonu elektrických vozidel jako jsou golfové vozíky, vysokozdvizné vozíky, elektrické skútry a jiné. Hlavním požadavkem u tohoto typu akumulátorů je vysoká životnost při velkém počtu nabíjecích a vybíjecích cyklů. [13]

Dělíme je na akumulátory pro malou a velkou trakci a také v závislosti na tvaru kladných elektrod - s trubkovými a mřížkovými elektrodami. Pro malou trakci se konstruují akumulátory s kapacitou od 12Ah do 180Ah, při napětí 6-12V. Vzhledově jsou podobné startovacím akumulátorům. Akumulátory pro velkou trakci se skládají z vysokokapacitních článků (100Ah - 1500Ah) při napětí 2V a vkládají se do izolovaných (plastových nebo ocelových) nosičů. Napětí takto složených akumulátorů bývá 24V, 28V nebo 80V.

Mřížkové elektrody jsou konstrukčně podobné těm ze startovacích akumulátorů, jejich plocha je ale větší a jsou 2x tak silné. [13]



Obr. 20: *Trakční článek s kladnými trubkovými elektrodami [13]*

8.3.3 Staniční akumulátory

Slouží jako záložní zdroje elektrické energie při přerušení funkce hlavního zdroje energie (nemocnice, banky, telekomunikace, počítačové systémy atd.). Vysoká provozní spolehlivost a dlouhá životnost v provozu trvalého dobíjení je u nich samozřejmostí. Vyrábějí se v kapacitách od 1Ah do 10 000Ah. Podle typu konstrukce dosahují životnosti až 20let. [13]



Obr. 21: *Staniční akumulátory*

8.3.4 Solární akumulátory

V solárních systémech je vhodné používat bezúdržbové, ventilem řízené akumulátory. Ty mají elektrolyt vázán ve speciální mikroporézní skelné tkanině, nebo ve formě gelu. [13]

Hlavní požadavky na solární akumulátory:

- vyšší odolnost proti hlubokému vybití
- nízký minimální nabíjecí proud
- nízké samovybíjení (1-3% za měsíc)
- dlouhá životnost (vysoký počet pracovních cyklů)
- vysoká akumulace elektrické energie (disponibilní povrch elektrod)
- gelové - žádné riziko vytečení při překlopení
- dobré ekologické vlastnosti
- minimální nároky na údržbu



Obr. 22: Solární akumulátor

Regulátory a měniče

Pro správnou funkci celého autonomního fotovoltaického systému, dosažení vysoké životnosti akumulátorů a možnosti použití standardních a levnějších spotřebičů na 230V/50Hz je potřeba do systému zařadit obvod pro kontrolu nabíjení a vybíjení akumulátorů (regulátor), a měnič a střídač napětí.

9. Regulátor

Jedná se o zařízení, které zapojujeme mezi fotovoltaický panel a akumulátor. Jeho hlavní funkcí je ochrana akumulátorů proti přebíjení a hlubokému vybití. Měří aktuální stav akumulátoru a podle výsledků volí režim nabíjení a při plném nabití udržuje nabíjení z fotovoltaických panelů. Typ regulátoru volíme podle pracovního napětí v systému, podle typu použitých akumulátorů, podle proudového výkonu panelů a také podle celkového příkonu elektrospotřebičů.

10. Měnič napětí

V případě, že chceme ušetřit a nechceme investovat do nákupu spotřebičů na 12V/24V, opatříme systém měničem napětí se střídačem. Toto zařízení dokáže transformovat stejnosměrné napětí na střídavé. Výkon měniče volíme podle max. spotřeby všech zařízení v obvodu s rezervou pro možné budoucí spotřebiče. Vlastností měniče musí být vysoká účinnost přeměny i při nízké zátěži, odolnost proti nadproudům a musí umožnit vysoké hodnoty rozběhového proudu. Měniče v autonomních systémech mají tu výhodu, že transformují poměrně stálé napětí narozdíl od měničů v systémech propojených s rozvodnou sítí, kde je nutné řešit sfázování a napěťovou nestálost v síti.

Experimentální část

Tato část se zabývá realizací ostrovního fotovoltaického systému, který je částečně umístěn na střeše budovy FEKT, Technická 10 – FV panely, pyranometr; a částečně v laboratoři fotovoltaiky ve 4. patře, kde jsou umístěny moduly pro nabíjení, vybíjení a jejich ovládání, dále pak počítač s ovládací a měřicí kartou Advantech PCI-1711. Ovládací program pro tento systém vytvořil Ing. Stanislav Janáč ve své diplomové práci (2009).

Úkolem tohoto systému je otestovat vliv různých režimů nabíjení a vybíjení akumulátorů na jejich životnost. Měřenými parametry jsou napětí na akumulátoru a nabíjecí proud. Při nabíjení můžeme stav akumulátoru kontrolovat buď pomocí kontroly napětí na akumulátoru nebo kontrolou prošlého náboje. Vybíjení probíhá konstantně, připojením odporové zátěže, kdy můžeme opět sledovat napětí na akumulátoru nebo jeho prošlý náboj. [16]

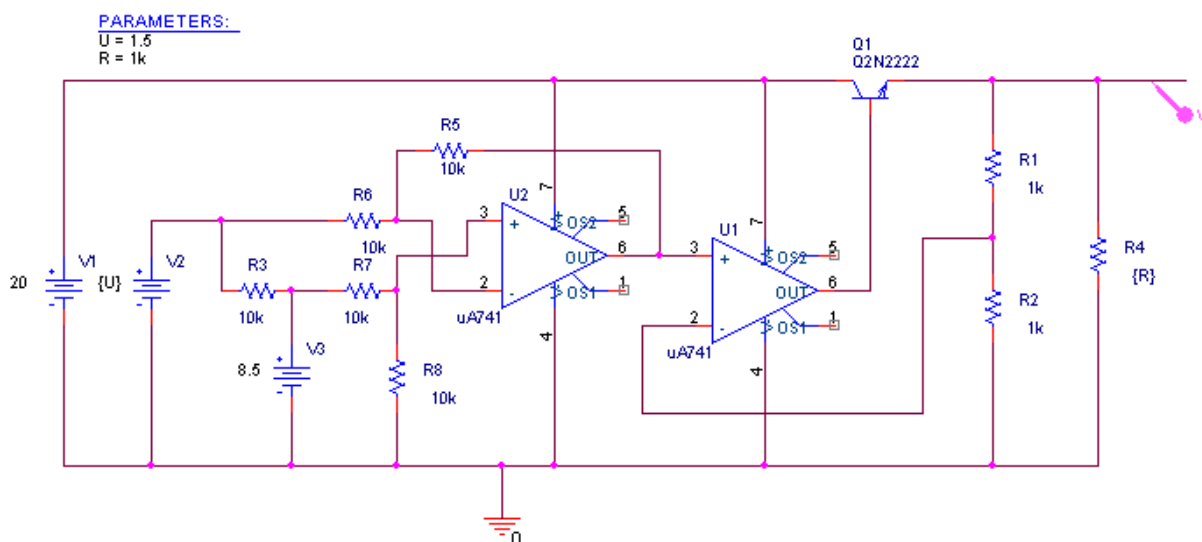
11. Komponenty systému

Základními komponenty jsou moduly nabíječů, což jsou zdroje konstantního napětí, dále pak moduly vybíječů, které fungují jako zdroje konstantního proudu. Mezi další důležité části patří reléové karty, které přepínají mezi jednotlivými režimy, ať už nabíjení či vybíjení, další reléové karty slouží k nastavení velikosti zátěže pro vybíjení akumulátorů a také reléová karta pro přepínání mezi nabíjením z FV panelů a nebo z laboratorního zdroje Diametral P230R51D. [16] Důležitou částí je také deska mikroprocesoru a moduly ochrany akumulátorů, které hlídají minimální napětí na akumulátorech a při jeho poklesu pod kritickou mez (v našem případě 9,6V) odpojí daný akumulátor ze systému. Některé komponenty realizoval Bc. Luboš Svoboda již při své bakalářské práci, některé navrhl a některé jeho návrhy jsem realizoval a modul ochrany akumulátorů jsem měl zcela na starost.

11.1 Moduly nabíječů

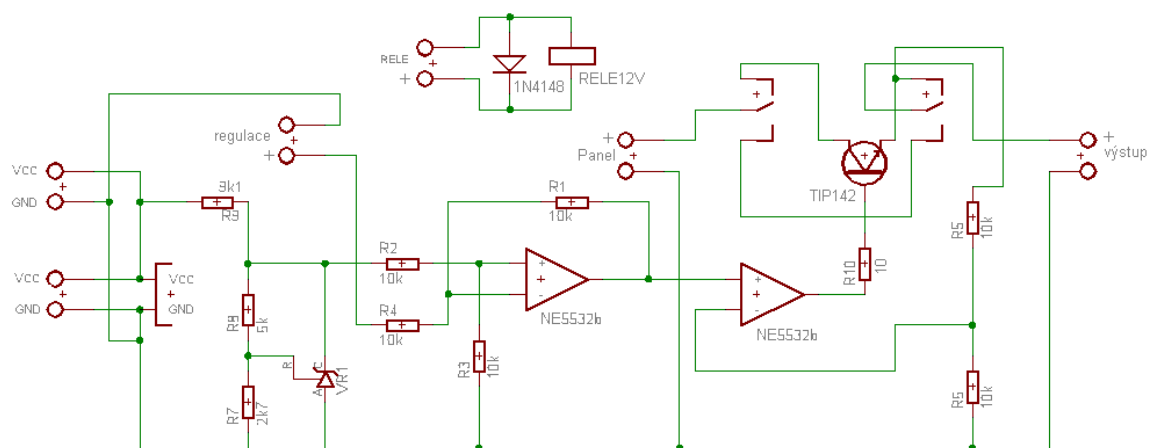
Tyto moduly, včetně modulů vybíječů a přepínacích reléových karet realizoval Bc. Luboš Svoboda a popíšu jen jejich základní funkci. Jak už bylo zmíněno, modul funguje jako zdroj konstantního napětí a je proudově omezen pouze proudem, který je schopen dodat FV panel a vnitřním odporem laboratorního zdroje. Na Obr. 23 je znázorněno schéma modelu nabíječe v simulačním programu PSpice, kde V1 je zdroj simulující max. napětí na FV panelu, V2 je zdroj proměnného referenčního napětí, kterým je regulován zdroj V3 – pevný zdroj referenčního napětí. Výsledná odchylka napětí těchto dvou zdrojů je zesílena

zesilovačem U2, který pracuje jako rozdílový a na jeho výstupu získáme napětí v rozmezí 6 – 8,5V. Výstupní napětí z U2 je dvakrát zesíleno zesilovačem U1 a přivedeno na bázi tranzistoru. Zesilovač U1 je zapojen jako neinvertující a přechod báze – emitor funguje zpětnovazebně. [16]



Obr. 23: Model nabíječe v programu PSpice [16]

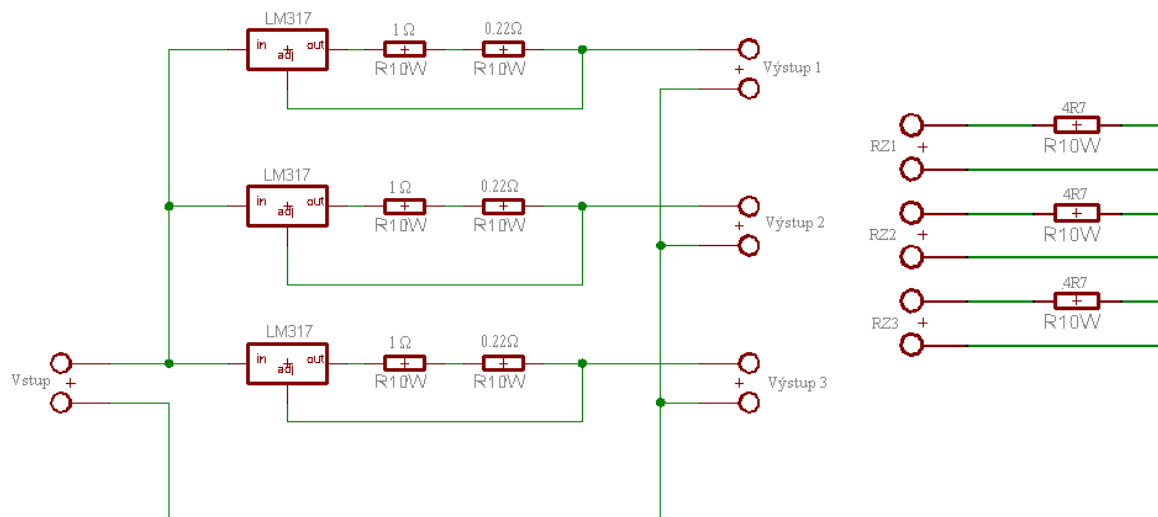
Na Obr. 24 je finální schéma zapojení nabíječe, který je realizován na DPS, kde se nacházejí dva nabíječe a jeden vybíječ. Druhý vybíječ je realizován na samostatné DPS a na předchozí je přimontován pomocí distančních sloupků. Výkonové prvky jsou umístěny tak, aby je bylo možné upevnit k chladiči. [16]



Obr. 24: Schéma zapojení nabíječe [16]

11.2 Moduly vybíječů

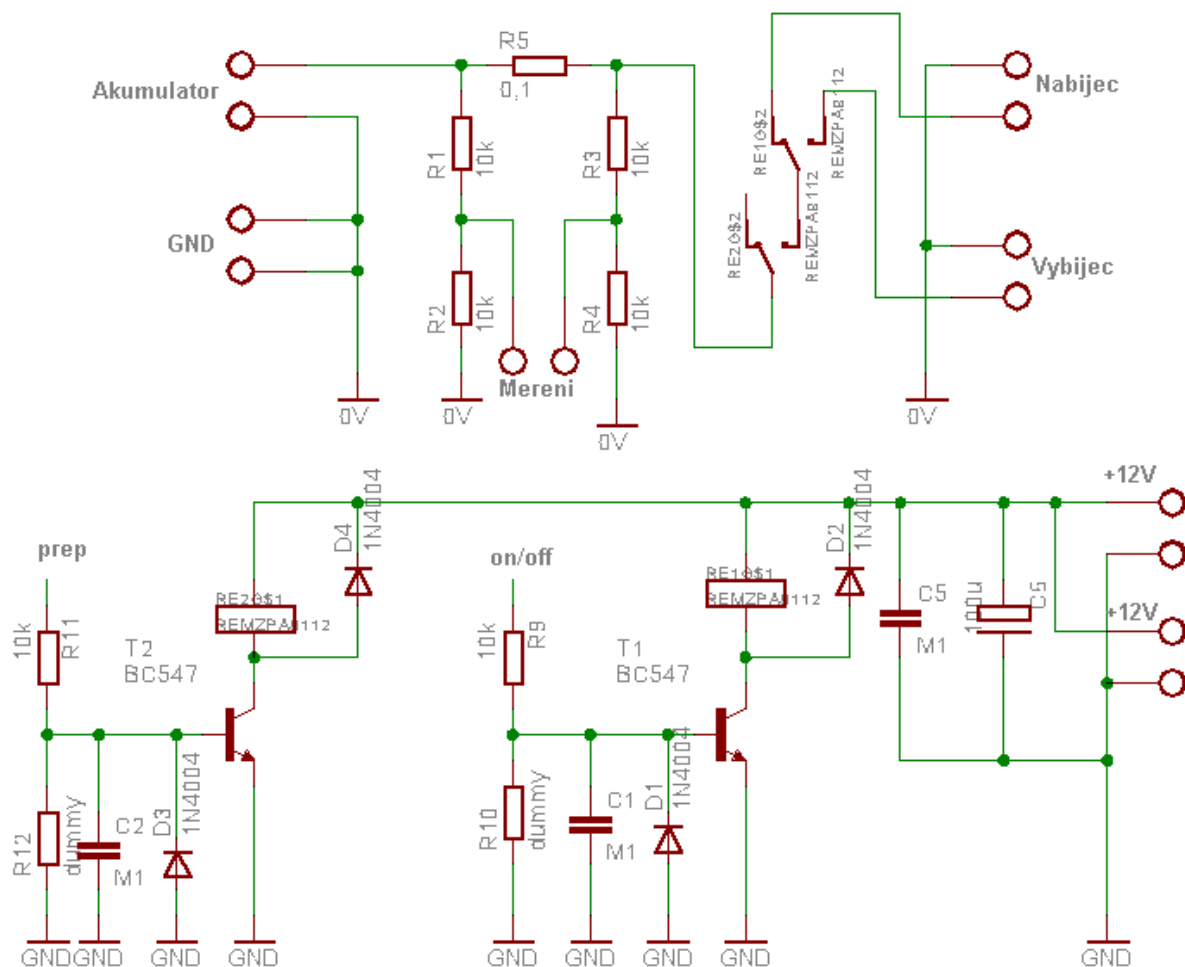
Konstrukce tohoto modulu je postavena na trojici integrovaných modulů LM317, které jsou zapojeny jako zdroje konstantního proudu. Takové množství IO pro jeden vybíječ je použito proto, že jeden obvod LM317 má výstupní proud omezen do 1,2A a námi požadovaný proud byl 3A. Výsledný vybíjecí proud je možné skokově měnit pomocí přídatné reléové karty s trojicí výkonových rezistorů (pro rozptýl přebytkového tepla z LM317) a rezistorů na kartě vybíječe (slouží k nastavení vybíjecího proudu), v krocích 1A, 2A a 3A. Na Obr. 25 je znázorněno schéma zapojení vybíječe. [16]



Obr. 25: Schéma zapojení vybíječe [16]

11.3 Přepínací reléová karta

Tento modul se stará o přepínání mezi režimem nabíjení a vybíjení. Ovládání je prováděno přes počítač, programem Ing. Stanislava Janáče. V počátku realizace systému bylo přepínání zajištěno průmyslově vyráběnými kartami, které disponovaly 16-ti spínacími relátky. Toto řešení se však neosvědčilo, protože došlo k selhání programu a ten dovolil spuštění procesů nabíjení a vybíjení současně. Proto Bc. Luboš Svoboda navrhl novou reléovou kartu, která tuto možnost zcela vylučuje, protože je namísto spínacích relé použito přepínacích. Je tedy možné akumulátory jenom nabíjet nebo naopak vybíjet. Obvod obsahuje dvojici relé, kde jedno z nich je přepínací - přepínání nabíjení - vybíjení a druhé spínací relé připojuje akumulátor. Schéma navržené přepínací karty je na Obr. 26. [16]

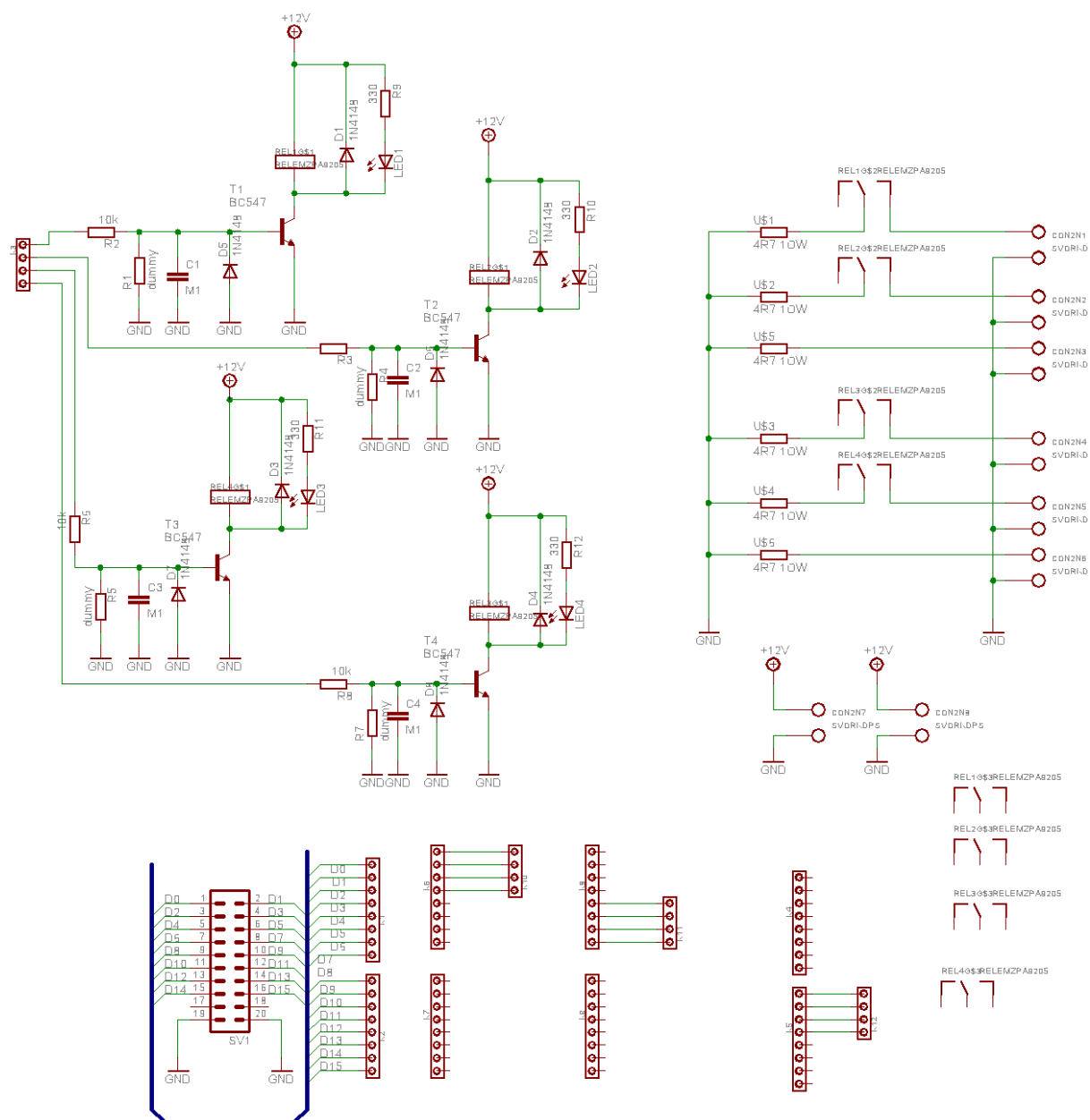


Obr. 26: Schéma přepínací reléové karty [16]

Další funkcí tohoto modulu je také měření napětí a protékajícího proudu akumulátoru. Rozsah pro měření napětí je do 20V a pro měření proudu je 10A. [16]

11.4 Releová karta pro nastavení proudu

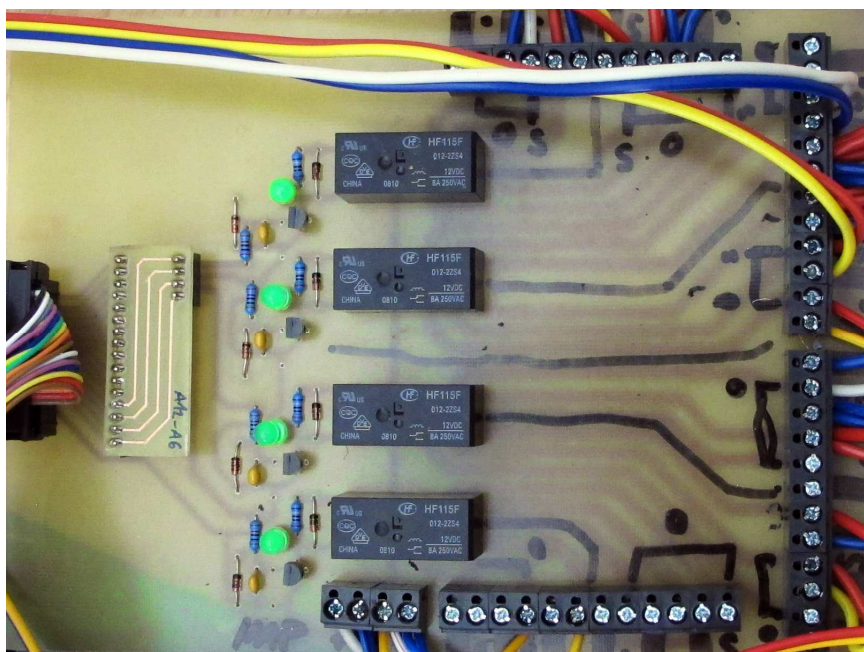
Tuto kartu opět navrhl Bc. Luboš Svoboda a mým úkolem byla její realizace. Funkcí této karty je změna vybíjecího proudu v rozsahu 1A – 3A v kroku po 1A. To zajišťují dvě relé a výkonové zatěžovací rezistory. V původním návrhu tyto rezistory vůbec nebyly, ale z důvodu vysoké teploty IO LM317 na kartě vybíječů byly použity pro rozptýl přebytkového tepla. Schéma zapojení je na Obr. 27. [16]



Obr. 27: Schéma releové karty pro nastavení proudu [16]

11.5 Modul přepínání mezi FV panely a laboratorním zdrojem

Další z modulů, který navrhoval Bc. Luboš Svoboda a já měl na starost jeho realizaci. Modul má za úkol přepínat zdroj nabíjení, buďto FV panely nebo laboratorní zdroj. V běžném provozu, za běhu programu FOTOVOLTAIKA slouží jako zdroj fotovoltaiické panely. V režimu měření kapacity pomocí programu KAPACITA modul přepne na externí laboratorní zdroj 14,4V.[16]



Obr. 28: *Fotografie finálního modulu přepínání FV/Zdroj*

11.6 Moduly pro nastavení napětí nabíječů

Moduly sloužící k nastavení výstupního napětí nabíječů pomocí počítačového rozhraní. Základem je DA převodník MCP4922 od firmy Microchip, který se vyrábí v pouzdře DIL ve dvou variantách, buďto jeden nebo dva převodníky v jednom pouzdře. Z důvodu párování většiny modulů v systému byl použit zdvojený typ. [16]

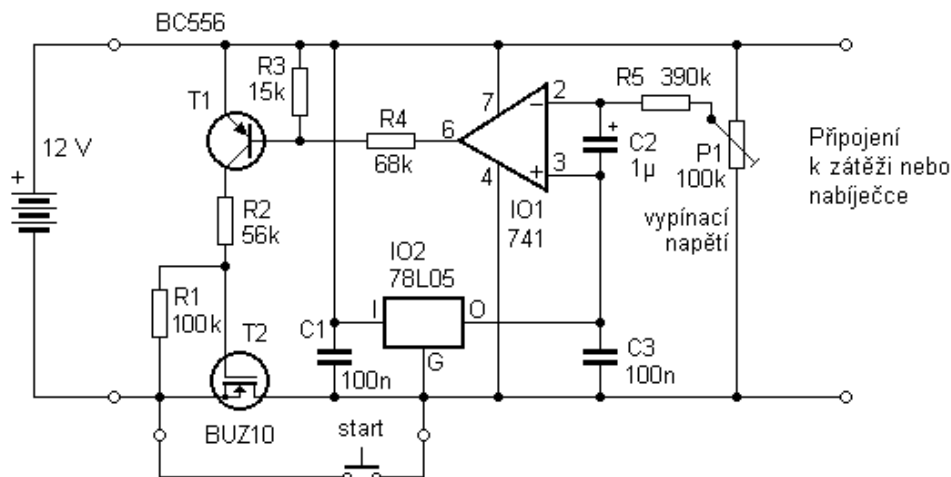
11.7 Mikroprocesorová deska

Jedná se o modul nastavující výstupní napětí nabíječů a velikost vybíjecího proudu. Hlavním prvkem modulu je mikroprocesor Atmega 16. Obsahuje paměť EEPROM, k uložení nastavených parametrů, tudíž není třeba, aby byl modul neustále připojen k počítači. Stačí parametry jednou nastavit a uložit je na příslušnou paměť. V případě potřeby je možné parametry změnit opětovným přepsáním nastavení v paměti. [16]

11.8 Modul pro ochranu akumulátorů

Tento modul se stará o ochranu akumulátorů proti úplnému vybití, jak k tomu došlo při chybě ovládacího programu. Po vyzkoušení vlastních zapojení různých komparátorů s referenční Zenerovou diodou, kdy docházelo k velkému zahřívání této diody nebo nespolehlivém odpojování, se jako nejstabilnější a nejspolehlivější nakonec ukázalo zapojení pana Jaroslava Belzy, u kterého lze navíc měnit hodnotu napětí, při kterém bude akumulátor odpojen.

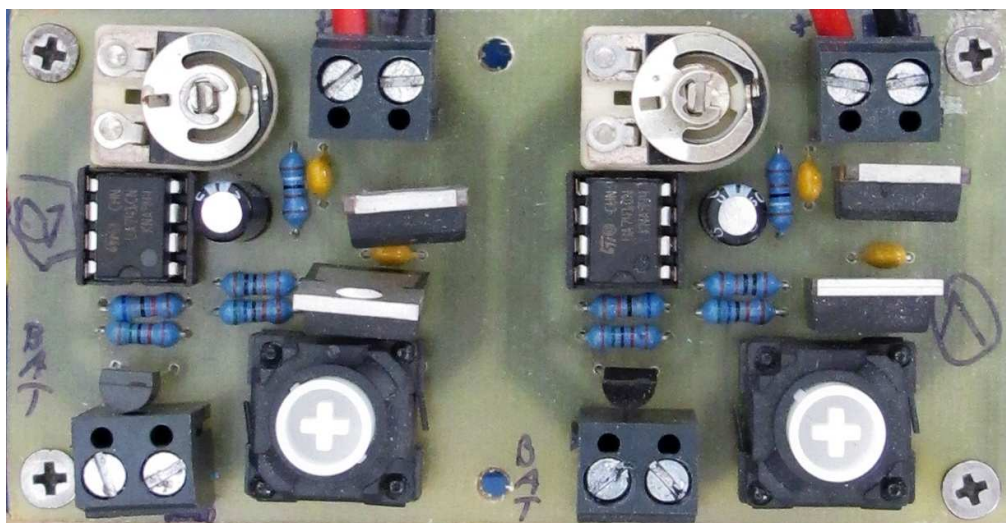
U původního zapojení byl použit operační zesilovač TAA68. Ke správné funkci potřebuje tento OZ rezistor zapojený mezi kladným napájecím napětím a výstupem. Pro naše účely zcela postačí OZ typu 741. [17]



Obr. 29: Schéma zapojení odpojovače [17]

Za předpokladu, že je tranzistor T2 otevřen a výstupní svorka je připojena na záporný pól akumulátoru, se celkové výstupní napětí porovnává s výstupním napětím stabilizátoru IO2. V případě, že je akumulátor dostatečně nabitý a jeho napětí je přivedeno na invertující vstup, bude výstupní napětí OZ IO1 rovno 0V, protože při porovnání s napětím na neinvertujícím vstupu, což je 5V ze stabilizátoru IO2 je napětí akumulátoru větší. To znamená, že tranzistor T1 je otevřen a udržuje v sepnutém stavu tranzistor T2. Když se akumulátor vybíjí, jeho napětí klesá. Při poklesu pod mez nastavenou trimrem P1 dojde k překlopení komparátoru IO1 a tranzistory T1 a T2 se uzavřou, tím dojde k okamžitému odpojení akumulátoru. I když na svorky připojíme nabitý akumulátor obvod zůstane stále odpojen a připojení akumulátoru k systému je možné jen stiskem tlačítka START. Výhodou je, že toto zapojení lze použít i v případě nabíjení akumulátoru, jelikož je tranzistor T2 schopný provozu i v závěrném směru díky opačně polarizované diodě, kterou má ve své struktuře mezi vývody S a D. Odpor tranzistoru BUZ10 v sepnutém stavu je jen 0,08 Ω , což nebude mít vliv na průběh nabíjení. [17]

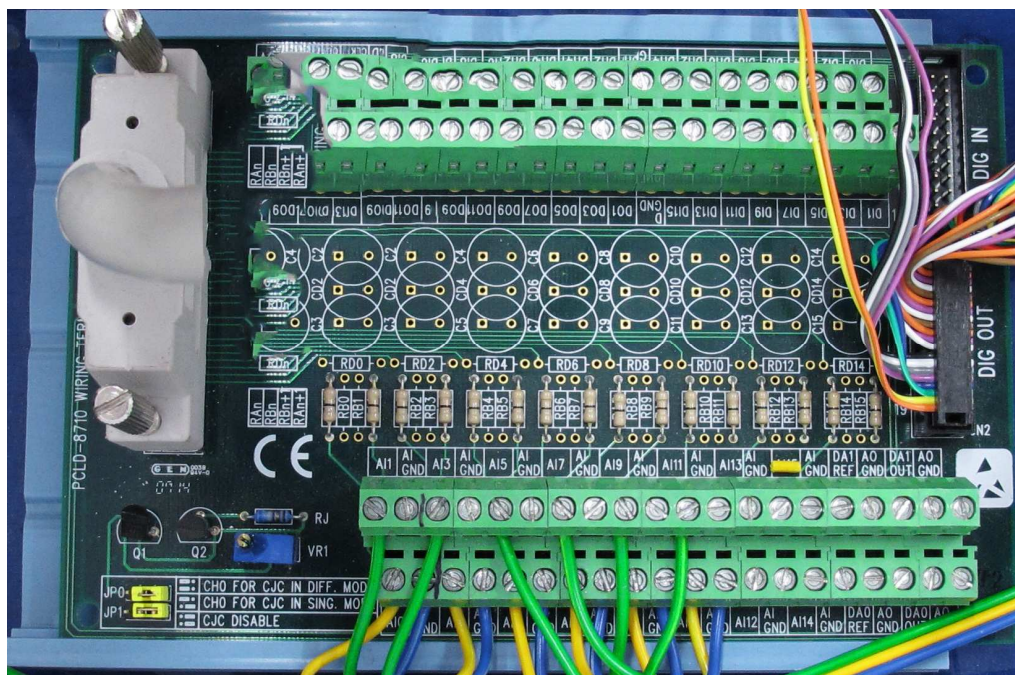
Modul je napájen přímo z baterie z důvodu, že by došlo k výpadku el. energie či poruše zdroje, čímž by mohlo opět dojít k úplnému vybití akumulátoru jako při softwarovém řešení. Klidový odběr modulu je 4,7mA, což je celkem zanedbatelná hodnota vzhledem ke kapacitě akumulátoru a nemůže tudíž dojít k úplnému vybití akumulátoru. Je-li trvalý odběr proudu z akumulátoru do cca 4A, není nutné chlazení pro tranzistor T2. DPS odpojovače je realizována po dvou modulech z důvodu spárování s nabíječi a vybíječi.



Obr. 30: *Fotografie finálního modulu odpojovačů*

11.9 Hardware pro sběr dat

Primárně jsou naměřená data uložena do paměti počítače, který je vybaven multifunkční měřicí kartou PCI-1711, ke které je pomocí propojovacího kabelu připojen také terminál PCLD-8710. Pro měření napětí a proudu je využito 12 analogových vstupů a jeden je určen k měření intenzity slunečního záření. Digitální výstupy slouží k samotnému ovládání systému, 12 pro přepínání mezi nabíjením a vybíjením a 4 pro přepínání mezi FV panely a externím laboratorním zdrojem. [16]



Obr. 31: *Terminál PCLD-8710*

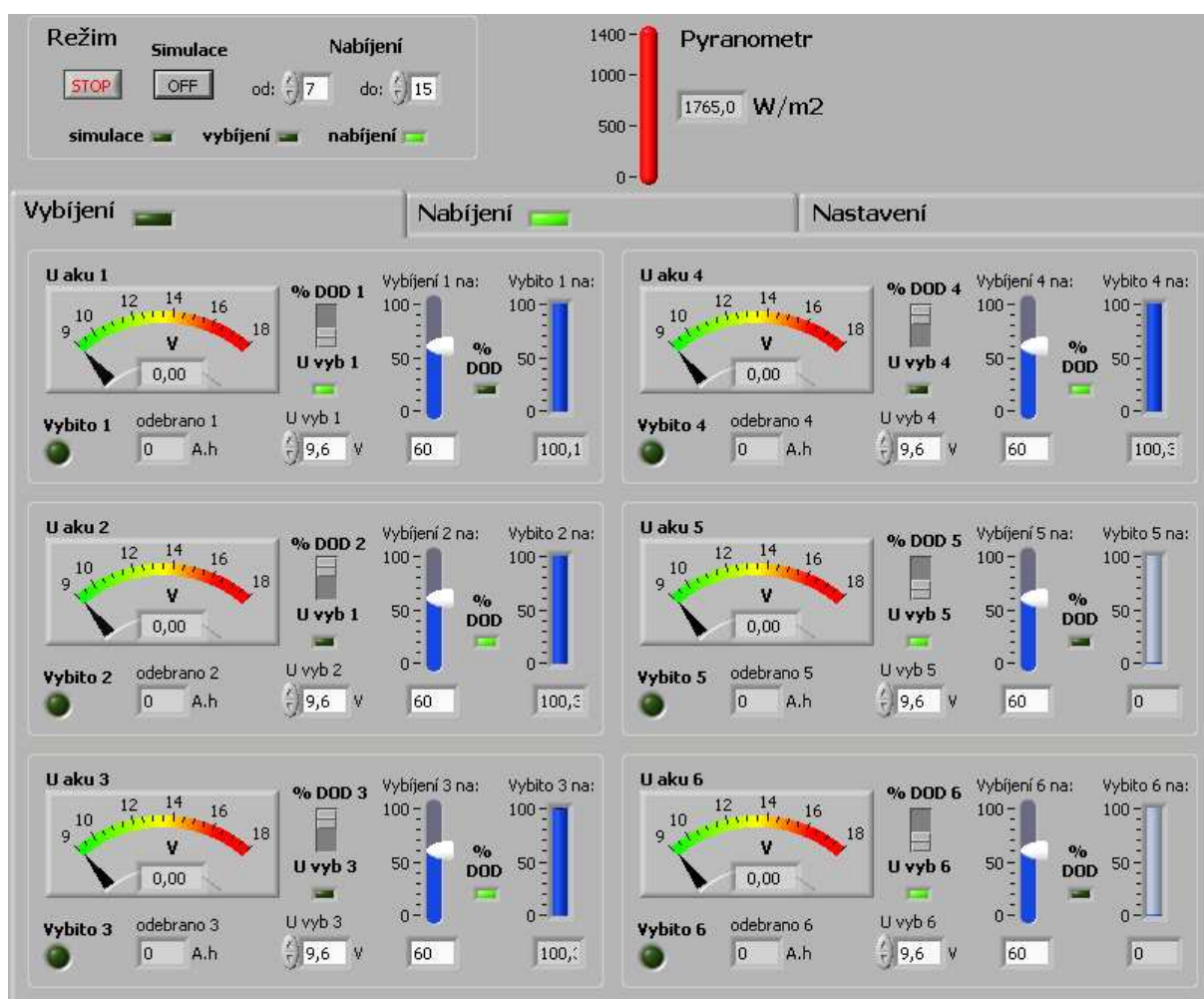
11.10 Software pro ovládání experimentu

Základním softwarem jsou programy FOTOVOLTAIKA a KAPACITA, které vytvořil Ing. Stanislav Janáč ve své diplomové práci. První ze zmíněných slouží k přepínání režimů nabíjení a vybíjení a k ukládání naměřených dat a druhý pak k měření kapacity akumulátorů. K nastavení výstupního napětí nabíječů a vybíjecího proudu pak slouží speciální program SET PARAMETERS.

11.10.1 Fotovoltaika

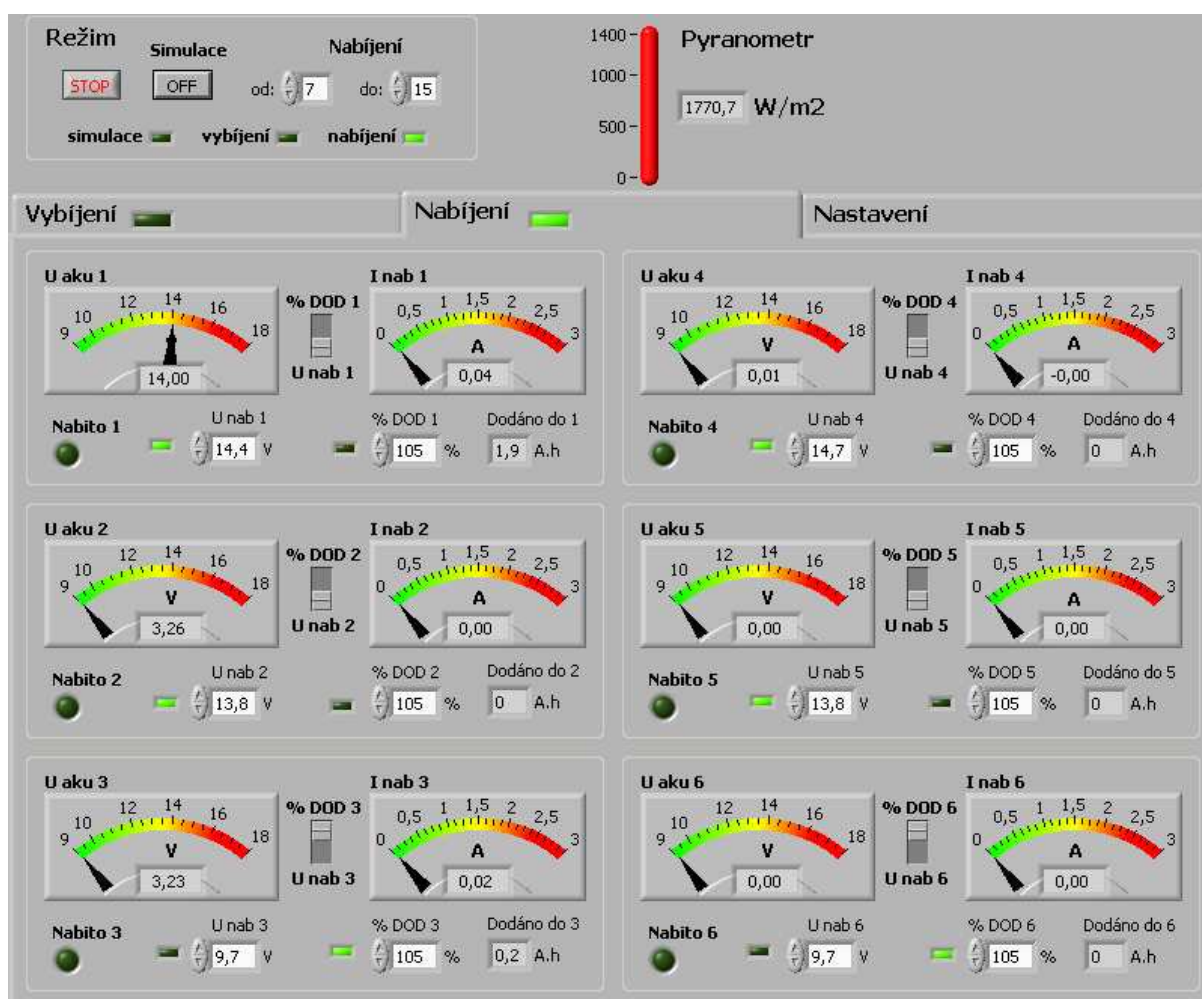
Program je vytvořený v programovacím prostředí Labview a jedná se o hlavní část programového vybavení tohoto systému. Některé funkce programu museli být změněny v důsledku výměny původních reléových karet nabíječů a vybíječů se spínacími relé za karty s přepínacími relé. A také byla odstraněna funkce pro nastavení vybíjecího proudu, která je nyní řešena čistě hardwarově pomocí další releové karty a její ovládání obstarává mikroprocesorová deska. [16]

Program má tu výhodu, že jej lze upravovat i na počítačích bez měřicí karty, díky tomu, že běží i v režimu simulace. Tento režim je nastaven ihned po zapnutí programu a po přepnutí do ostrého režimu začne systém okamžitě číst data z terminálu měřicí karty. V případě, že měřicí karta chybí nebo dojde k její poruše, oznámí program kritickou chybu. Vzhled jednotlivých obrazovek programu a rozmístění ovládacích prvků je znázorněno na Obr. 32 až Obr. 34. V základním zobrazení zůstávají tlačítka pro přepínání režimu simulace, nastavení času nabíjení a také ukazatel aktuální intenzity slunečního záření, který zobrazuje hodnoty naměřené pyranometrem, umístěným na střeše s FV panely. Na výběr pak máme ze tří záložek: Vybíjení, Nabíjení a Nastavení. Na Obr. 32 vidíme rozmístění ovládacích a informačních prvků v záložce Vybíjení, jelikož experiment zahrnuje test vlivu nabíjení a vybíjení u šesti akumulátorů, obsahují záložky Nabíjení a Vybíjení právě tolik ovládacích a informačních prvků. Při vybíjení akumulátoru měříme jeho napětí a vybíjecí proud je konstantní, nastavitelný ve třech krocích na záložce Nastavení, tento nastavený proud slouží pouze pro výpočet, reálná hodnota se nastavuje pomocí programu SET PARAMETERS. Z nastaveného proudu a času vybíjení pak program spočítá velikost prošlého náboje. Vybíjení můžeme provádět ve dvou režimech, a to buď hlídáním napětí na akumulátoru, kdy při poklesu pod námi zvolenou mez je akumulátor odpojen nebo měřením prošlého náboje, v tom případě potřebujeme znát kapacitu akumulátoru a velikost náboje při nabití. Při odběru námi nastavené velikosti náboje z akumulátoru je tento opět odpojen. [16]



Obr. 32: Záložka Vybíjení programu Fotovoltaika

Další záložkou je Nabíjení, jejíž rozmístění prvků vidíme na Obr. 33. Zde opět můžeme vybírat z režimu hlídání napětí nebo měření prošlého náboje. Lze nastavit buď hodnotu napětí do které budeme nabíjet, nebo velikost náboje který bude dobit do akumulátoru.



Obr. 33: Záložka Nabíjení programu Fotovoltaika

Na Obr. 34 je pak rozmístění prvků na záložce Nastavení. Vlevo nahoře na této záložce nastavujeme časovou prodlevu, po které se snímají data z měřicí karty. Pokud je prodleva vypnuta, probíhá toto měření bez časového omezení a ukládá se velké množství naměřených dat, což ztěžuje jejich zpracování. Pod položkami prodlevy měření se nachází část s nastavením odporových bočníků pro kalibraci měření proudu. Další položkou je nastavení vybíjecích proudů ve třech krocích. Dvě části jsou pak věnovány akumulátorům a to konkrétně nastavení kapacity použitých akumulátorů a energie v akumulátoru v režimu měření prošlého náboje. Poslední částí této záložky je sekce simulace, která nemá na reálný provoz žádný vliv. [16]



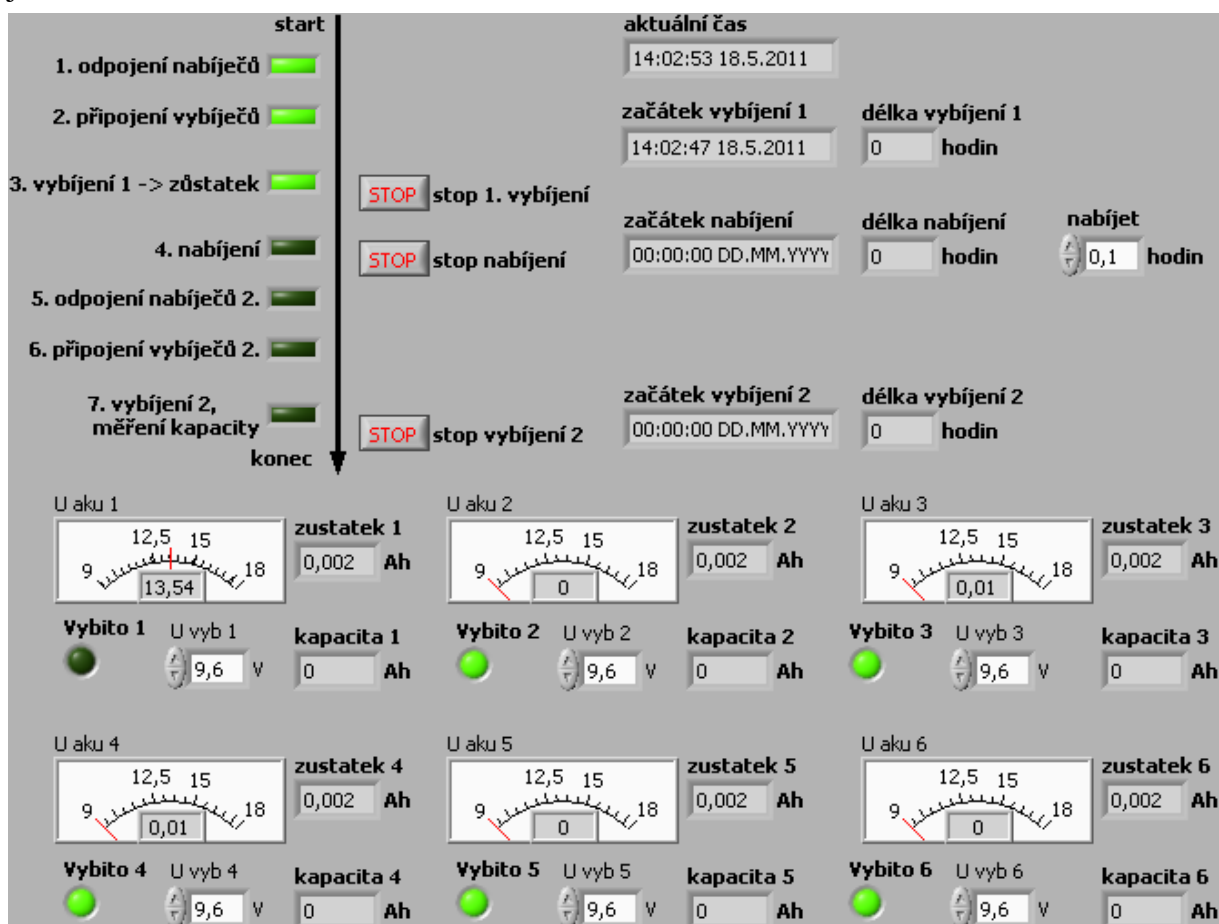
Obr. 34: Záložka Nastavení programu Fotovoltaika

Změřená data jsou uložena do textového souboru, zvlášť ve složce pro nabíjení a vybití. Každý den se vytvoří nový soubor s datem a časem v názvu. V samostatném souboru se také ukládá naměřená intenzita slunečního záření. V každém souboru jsou na úvod data s informacemi o prostředí Labview a následují 4 sloupce s naměřenými hodnotami. V souboru pro vybití náleží tyto sloupce položkám: odebraný náboj, zbylý náboj, napětí na akumulátoru a čas měření jednotlivých hodnot. V souboru pro nabíjení akumulátoru jsou to sloupce: nabíjecí proud, napětí na akumulátoru, zbylý náboj a opět čas pro jednotlivé hodnoty.

11.10.2 Kapacita

Druhým programem pro ovládání experimentu je Kapacita, který opět vytvořil Ing. Stanislav Janáč a slouží k měření kapacity akumulátorů. Z důvodu změny releových karet byla opět nutná úprava programu a také byla přidána funkce pro připojení externího laboratorního zdroje. [16]

Tento program má pouze jednu obrazovku bez přepínacích záložek a jeho vzhled je znázorněn na Obr. 35.



Obr. 35: Program Kapacita

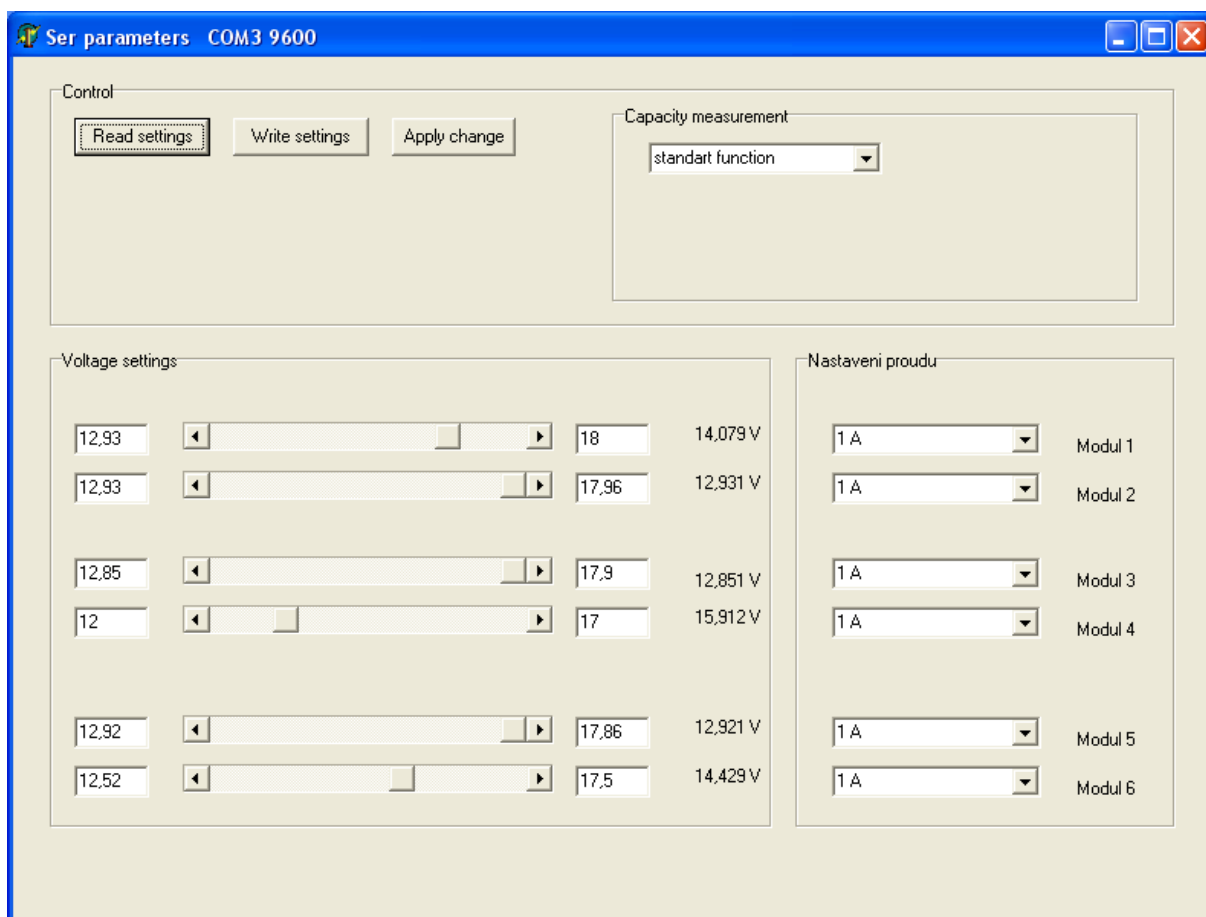
K měření kapacity je využito laboratorního zdroje Diametral P230R51D, který dodává konstantní napětí oproti FV panelům a tudíž je proces nabíjení snáze kontrolovatelný. Po spuštění programu se tedy připojí externí laboratorní zdroj a přemostí se nabíječe, akumulátory se vybijí na stanovenou mez – tak aby nedošlo k jejich poškození. Až jsou všechny akumulátory vybity, spustí se proces nabíjení po dobu nastavenou v programu. Po nabití akumulátorů se provede proces měření kapacity procesem vybíjení do doby, než se vybijí všechny akumulátory. Po té program uloží hodnoty naměřených kapacit do výstupního souboru a zobrazí je na obrazovce. [16]

11.10.3 Set parameters

Poslední z trojice systémových programů je program sloužící k nastavení výstupního napětí nabíječů a vybíjecího proudu vybíječů, které bylo odstraněno z programu Fotovoltaika.

Program tyto nastavené hodnoty zapíše do paměti EEPROM v mikroprocesoru na mikroprocesorové DPS a je možné je z ní načíst v době kdy je modul odpojen od počítače.

Program vytvořil Bc. Luboš Svoboda v programovacím prostředí Borland Delphi. Nastavené hodnoty je možné pomocí tlačítka Read settings načíst z paměti EEPROM a naopak tlačítkem Write settings je do této paměti zapsat. Tlačítko Apply change odešle nastavení k modulům a nastavené hodnoty zapíše do EEPROM. [16]

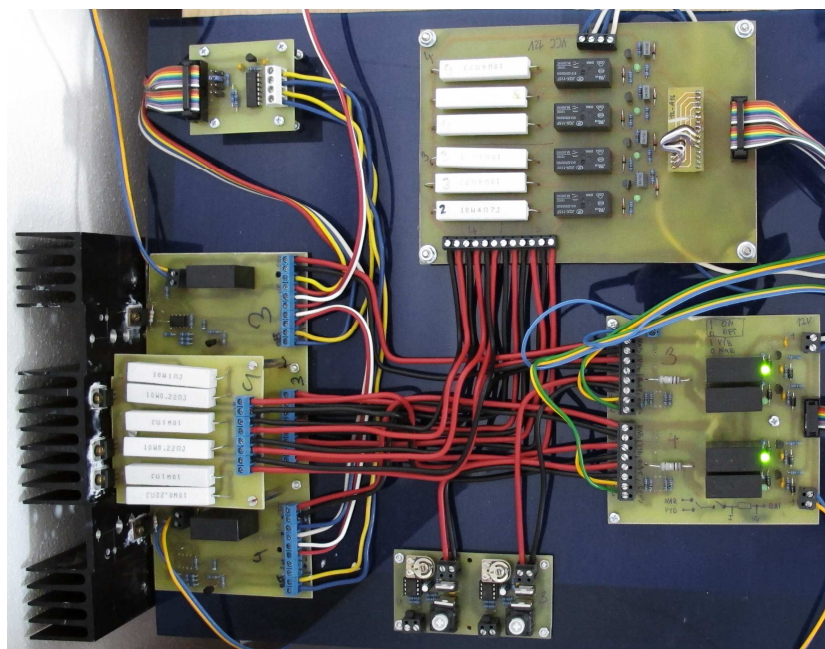


Obr. 36: Ovládací prostředí programu Set Parameters

12. Instalace systému

Řídící a měřicí část systému je instalována v laboratoři fotovoltaiky ve 4. patře. Jednotlivé DPS jsou rozděleny do šesti stejných bloků (pro 6 FV panelů a 6 olovených akumulátorů) a uspořádány po dvojicích do třech velkých modulů (z důvodu provedení většiny DPS - komponenty na jedné DPS). Pro udržení přehlednosti, bezpečnosti a ochrany jednotlivých komponent (např. proti zkratu či mechanickému poškození) jsou jednotlivé DPS upevněny přes distanční sloupky (lepší mechanické i chladicí vlastnosti systému) k plexisklové desce, která byla k dispozici v laboratoři olovených akumulátorů. Každý komponent (2 nabíječe, 2 vybíječe, 2 ochrany...) je umístěn na jedné desce z plexiskla a takto sestavená část systému je umístěna včetně počítače s měřicí kartou na jeden stůl v blízkosti průchodky pro propojení se zbytkem systému umístěným za obvodovým zdívem na střeše.

Na fotografii Obr. 37 je znázorněno rozmístění jednotlivých komponent jednoho z hlavních modulů. V horní části nalevo se nachází modul pro nastavení výstupního napětí nabíječů se svorkovnicemi pro připojení FV panelů a vlevo dole pak moduly nabíječů a vybíječů s výkonovými prvky připevněnými k chladičům. Dole uprostřed se nachází moduly ochrany akumulátorů, přes které se akumulátory do systému připojují. Vpravo nahoře se nachází releová karta se zátěžovými odpory pro nastavení vybíjecího proudu. Vpravo dole je pak přepínací releová karta, která má na starost přepínání režimů nabíjení a vybíjení a připojování akumulátorů přes ochranu proti jejich vybití. Takto uspořádaný a elektricky propojený modul komponent je připojen k mikroprocesorové desce.



Obr. 37: Fotografie rozložení jednotlivých komponent jednoho z modulů

13. Příprava a montáž FV panelů

Jelikož byl celý systém původně umístěn v areálu fakulty na Údolní 53, bylo jej nutné nejdříve přemístit a znovu sestavit na pochozí střeše budovy Technická 10 (4. patro) a v laboratoři fotovoltaiky ve 4. patře.

Bylo nutné obrousit a natřít nosnou konstrukci, sestavit ji a namontovat na ni 6 FV panelů. Některé panely byly použity z předchozího experimentu a některé byly nahrazeny. Z důvodu nekompatibility montážních otvorů nových panelů bylo potřeba upravit konzoly pro upevnění panelů na konstrukci. Změřily se montážní otvory nových panelů a převrtaly se montážní otvory v konzolách v mechanické dílně laboratoře olověných akumulátorů. Poté bylo možné nové panely namontovat na konzole nosné konstrukce. Nosnou konstrukci bylo potřeba ještě mechanicky zajistit proti převrnutí či posunutí vlivem silného větru, protože plocha instalovaných panelů byla větší než u původního systému, kdy byly použity pouze malé FV panely do výkonu 50Wp. Poté se čekalo na specializovanou firmu, která provedla montáž průchodky skrz nosné obvodové zdivo do laboratoře fotovoltaiky aby mohly být připojeny FV panely a pyranometr k ovládacímu a měřicímu terminálu.



Obr. 38: *Pohled na konstrukci a FV panely zezadu*

Protože některé panely neměli identifikační štítek, nebylo možné dohledat jejich parametry na stránkách výrobce. Proto jsem provedl měření VA charakteristik všech FV panelů v systému a tím jsme získaly parametry jednotlivých panelů v reálném provozu, což nám řekne více než parametry udávané výrobcem při ním daných podmínkách. Měření bylo prováděno měřicím přístrojem PROVA 210, který je určen k měření VA charakteristik a dalších parametrů FV panelů. Tento měřicí přístroj má monochromatický grafický display s podsvícením, na kterém se zobrazuje výsledná VA charakteristika s vypsányými naměřenými parametry. Tyto parametry je možné také přenést do počítače nebo pomocí počítače přímo měřit a zobrazovat naměřené hodnoty v grafickém prostředí dodávaného softwaru. Připojení měřicího přístroje je možné pomocí speciálního optočlenu s RS-232C/USB rozhraním, jelikož má přístroj pouze optický výstup. Z důvodu časové tísně bylo provedeno pouze měření přístrojem bez připojení k PC a tudíž bez grafického výstupu VA charakteristik.



Obr. 39: *Pohled na FV panely zepředu*

Měření proběhlo 18.5. 2011 od 12:00-13:30. za polojasného až jasného počasí. Pro měření byl dále použit pyranometr TM-RS81-1 s připojeným digitálním zobrazovačem intenzity dopadajícího záření EMSRI, který vyrobil Ing. Radek Stojan a bezkontaktní digitální teploměr CEM DT-8819 pro měření teploty FV panelů. Měření každého z panelů probíhalo dvakrát pro kontrolu naměřených hodnot. Pro každý měřený panel bylo nutné zadávat do přístroje PROVA 210 intenzitu dopadajícího slunečního záření, pro potřebu dopočtu některých parametrů. Z naměřených parametrů pak byla vypočtena hodnota účinnosti přeměny podle rovnice

$$\eta = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} [\%] \quad (4)$$

kde U_{mp} je napětí při maximálním výkonu článku, I_{mp} pak proud při max. výkonu článku a p_{in} je energie dopadajícího záření, kterou vypočítáme z intenzity dopadajícího záření naměřené pyranometrem a z aktivní plochy FV panelu

$$p_{in} = \Phi_{in} \cdot S_A [W] \quad (5)$$

kde Φ_{in} je intenzita dopadajícího záření a S_A je aktivní plocha FV panelu. A také byla dopočtena hodnota plnicího faktoru FF podle rovnice

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} [-]$$

kde U_{oc} je napětí naprázdno a I_{sc} proud nakrátko.

Naměřené a dopočtené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2 *Tabulka naměřených parametrů FV článků*

Číslo panelu	1	2	3	4	5	6
Výrobce FV panelu	-	Microsol	Microsol	Solartec	Isofoton	Eurosolare
Typ FV panelu	-	MM0225-G	MM0225-G	STR 36-50	M55L	-
Materiál	monokrystal	monokrystal	monokrystal	monokrystal	monokrystal	polykrystal
Teplota FV panelu [°C]	48,7	53,9	52	49	55	50
Φ_{in} [W/m ²]	821	791	793	793	893	860
U_{oc} [V]	19,150	32,540	21,870	18,960	12,930	19,000
I_{sc} [A]	2,520	7,494	7,594	2,678	2,980	2,824
P_m [W]	33,730	173,800	114,200	35,280	27,010	33,760
U_{mp} [V]	14,980	25,400	16,910	14,860	10,220	13,580
I_{mp} [A]	2,252	6,844	6,927	2,374	2,642	2,485
η [%]	11,180	15,836	15,569	12,106	8,231	10,690
FF	0,698	0,712	0,706	0,694	0,696	0,629
Rozměry panelu						
šířka [cm]	45,5	99,0	99,0	45,3	32,7	44,8
výška [cm]	100,3	166,0	166,0	100,5	129,1	99,5
počet využitých článků	36	60	40	36	36	36
S_A [m ²]	0,367	1,388	0,925	0,367	0,367	0,367

Oproti testovacím podmínkám většiny výrobců byla při tomto měření menší intenzita dopadajícího záření (většina výrobců udává 1000W/m²) a také teplota panelů byla přibližně dvojnásobná (většina výrobců udává 25°C). Což jednak snižuje max. generovaný proud v případě menší intenzity dopadajícího záření a vysoká teplota má vliv na max. napětí dodávané panelem. Panely Microsol jsou totožné, jen pro představu byl jeden změřen i při zapojení pouze dvou 12-ti článkových bloků s $U_{mp}=16,91V$, což zcela postačuje pro dobíjení akumulátoru. Panel od firmy Eurosolar nevyhovuje požadavkům na nabíjení akumulátorů přes modulové nabíječe a je využit pouze experimentálně pro přímé nabíjení akumulátoru.

14. Spuštění experimentu

Po odladění jednotlivých komponent, jejich propojení a připojení FV panelů byl systém spuštěn ve zkušebním provozu, s jedním akumulátorem, blok po bloku. Zkušební akumulátor byl olověný akumulátor 12V/2,2Ah. Jako první byla tetována část bez FV panelů, kdy jako zdroj sloužil laboratorní zdroj Diametral P230R51D s nastaveným výstupním napětím 14,4V. Po otestování první části systému byl spuštěn program Kapacita a proběhlo měření kapacity téhož akumulátoru. Po úspěšném změření kapacity akumulátoru byl proveden dlouhodobý test celého systému s připojenými FV panely programem Fotovoltaika. Systém v tomto provozu funguje s občasnými přestávkami od druhé poloviny dubna 2011 a každý den sbírá a ukládá potřebná data. Některé z naměřených a vyhodnocených hodnot v grafech jsou uvedeny v příloze, a veškerá naměřená data pak na přiloženém CD.

V této fázi už nic nebrání spuštění dlouhodobého experimentu s novými akumulátory a testování různých režimů nabíjení - vybíjení, které byly zvoleny následovně:

- vybíjení do 60% DOD, nabíjení s napětovým omezením na 2,30V na článek,
- vybíjení do 60% DOD, nabíjení s napětovým omezením na 2,45V na článek,
- vybíjení do 60% DOD, nabíjení s omezením celkového prošlého náboje na 105%,
- vybíjení do 60% DOD, nabíjení bez omezení,
- vybíjení do 100% DOD, nabíjení s napětovým omezením na 2,30V na článek,
- vybíjení do 100% DOD, nabíjení s omezením celkového prošlého náboje na 105%,

Závěr

Úkolem v této diplomové práci bylo vytvořit autonomní fotovoltaický systém, který bude testovat různé režimy nabíjení a vybíjení a vliv těchto režimů na životnost olověných akumulátorů. Celý systém byl sestaven a umístěn na Technické 10, ve 4. patře, v laboratoři fotovoltaiky (ovládací a měřicí část, akumulátory) a na pochozí střeše (FV panely na nosné konstrukci, pyranometr).

Celý systém funguje bez vážných problémů, s odstraněnými nedostatky, kterými trpěl předchozí systém. Nejzávažnějším problémem byla nedostatečná ochrana akumulátorů, kdy vinou řídicího programu došlo ke zničení akumulátorů. To bylo vyřešeno samostatným obvodem, který se stará o včasné odpojení akumulátorů od systému v případě poruchy. Ovládací a měřicí software byl použit z původního systému, který vytvořil Ing. Stanislav Janáč, s drobnými úpravami. Změněna byla také metodika spouštění nabíjení a vybíjení, kdy byla spínací relé nahrazena přepínacími, aby nedocházelo k chybnému spuštění obou režimů zároveň.

Systém momentálně funguje ve zkušebním provozu a nic nebrání jeho spuštění v plném rozsahu.

Hodnoty, které systém doposud nasbíral jsou vyneseny do grafů a uvedeny jako příloha k této práci. Všechna nasbíraná data jsou pak součástí vloženého CD. Součástí přílohy jsou též osazovací výkresy realizovaných modulů a pohled na DPS ze strany plošných spojů.

Použitá literatura

- [1] Ing. Jaromír Řehák; Ing. Jiří Bártek, CSc.; Ing. Radim Mařinka. *Fotovoltaika a fotovoltaické systémy v podmínkách ČR a jejich navrhování* [online]. Praha : Česká energetická agentura, 2010 [cit. 2011-05-11]. Dostupné z WWW: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/98_8050.pdf>
- [2] RNDr. Jaroslav Kusala. *Solární energie* [online]. 2006 [cit. 2011-05-5]. Dostupné z WWW: < <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/solar.htm> >.
- [3] *Solarenvi : Fotovoltaika* [online]. 2011 [cit. 2011-05-5]. Ostrovní systémy. Dostupné z WWW: <<http://www.solarenvi.cz/slunecni-elektrarny/typy-instalaci/off-grid/>>.
- [4] *Fotovoltaické solární systémy* [online]. Ostrava , 2009. 22 s. Učební text. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Dostupné z WWW: <<http://rccv.vsb.cz/Island/docs/Fotovoltaika.pdf>>.
- [5] *Sluneční energie* [online]. Zlín, 2011. 14 s. Učební text. Universita Tomáše Bati. Dostupné z WWW: <http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_13.pdf>.
- [6] Prof. Ing. Vítězslav Benda, CSc., Ing. Kamil Staněk, Ing. Petr Wolf *Fotovoltaické systémy* [online]. Brno, 2011. 60 s. Učební texty k semináři. VUT v Brně. Dostupné z WWW: <http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_04_1104.pdf>.
- [7] Radim Bělohav. *Využití solární energie - fotovoltaické články* [online]. Tábor, 2006. 27 s. Závěrečná ročníkové práce. Střední průmyslová škola strojnická Tábor. Dostupné z WWW: <http://www.kpsoft.eu/_techinfo/00104/Solarni_energie.pdf>.
- [8] Antonín Vojáček. *Solární články a jejich použití v senzorce & automatizaci* [online]. 2005 [cit. 2008-11-25] Dostupné z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2005120501>>.

- [9] Doc. RNDr. Ivan Jelínek, CSc.; RNDr. Ondřej Dvořák, CSc., *Nové trendy ve vývoji fotovoltaických článků* [online]. 2010 [cit. 2010-10-15]
Dostupné z WWW: <http://www.asb-portal.cz/tzb/energie/nove-trendy-ve-vyvoji-fotovoltaickych-clanku-2032.html>
- [10] *Můj energetik* [online]. 2010 [cit. 2011-05-12]. Technologie. Dostupné z WWW:
<<http://www.mujienergetik.cz/mujienergetik/5-Technologie/6-Fotovoltaika>>.
- [11] Bc. David Němec. *Vývoj pohonných akumulátorů* [online]. Brno, 2010. 9 s. Semestrální práce. VUT v Brně. Dostupné z WWW:
<http://www.asportal.cz/chrudim/recenze/vyvoj_pohonnnych_akumulatoru/Vyvoj_pohonnnych_akumulatoru.pdf>.
- [12] Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D. *Olověné akumulátory* [online]. Plzeň : , 2006. 20 s. Elektronický text. Fakulta elektrotechnická ZČU v Plzni. Dostupné z WWW:
<<http://www.jergym.hiedu.cz/~canovm/elektro/clanky2/olov.pdf>>.
- [13] Ing. Jiří Vaněk, Ph.D., Ing. Petr Křivík, Ph.D., Ing. Vítězslav Novák, Ph.D. *Alternativní zdroje energie* [online]. Brno, 2006. 149 s. Elektronický text. VUT v Brně. Dostupné z WWW:
<<https://www.vutbr.cz/elearning/mod/resource/view.php?inpopup=true&id=123643>>.
- [14] Stand by energy s.r.o. [online]. [Obr. 2011-05-12] Dostupný z WWW:
http://www.standbyenergy.cz/upload/files/93/95-opzs_big.jpg
- [15] homeSOLAR [online]. [Obr. 2011-05-13] Dostupný z WWW:
<http://eshop.homesolar.cz/upload/foto/solarni-akumulator-150ah-12v-159-2.jpg>
- [16] SVOBODA, L. *Vývoj ostrovního fotovoltaického systému*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 72 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
- [17] Jaroslav Belza, *Odpojovač pro olověný akumulátor* [online]. [cit. 2010-03-21]
Dostupné z WWW: <http://belza.cz/files1/odp.htm>

Seznam použitých symbolů

Φ_0	intenzita světla, které vstoupilo do objemu materiálu
Φ_{in}	intenzita dopadajícího světla
α	absorpční koeficient
λ	vlnová délka dopadajícího záření
R	odrazivost
W_g	šířka zakázaného pásu
Δn	koncentrace nerovnovážných nosičů
τ	doba života nosičů
G	počet párů elektron - díra
R_p	paralelní odpor FV článku
R_s	sériový odpor FV článku
I_{SC}	proud nakrátko FV panelu
U_{OC}	napětí na prázdko FV panelu
I_{mp}	proud při max. výkonu FV panelu
U_{mp}	napětí při max výkonu FV panelu
p_{in}	energie dopadajícího záření
S_A	aktivní plocha FV panelu
FF	plnění faktor